

Dictaat Licht

Bouwkunde



Pantheon Rome, gebouwd rond het jaar 120, met de *oculus*, een opening met diameter 8,7 meter

Hogeschool Utrecht
Instituut voor Gebouwde Omgeving
Opleiding Bouwkunde
Samenstelling: L. Looijen / M. van der Laan
Auteur: ir. M. Aarts, TUE, Fac. Bouwkunde

December 2012

Dankwoord

Dit is het dictaat Licht, samengesteld op basis van het dictaat Bouwfysisch Ontwerpen 1 van de Technische Universiteit Eindhoven. Van dit dictaat zijn de teksten en illustratie gebruikt over het onderwerp "Licht". Hier en daar zijn kleine versimpelingen of aanvullingen aangebracht. Maar voor het grootste gedeelte is deze tekst afkomstig van ir. M. Aarts. We willen haar en haar collega's dan ook via deze weg hartelijk danken voor het ter beschikkingstellen van dit lesmateriaal.

ir. L. Looijen en ir. M. Van der Laan

Het dictaat Licht is in 2010 en 2012 herzien: spaar- en ledlampen worden nu behandeld, er zijn rekenvoorbeelden en enkele illustraties toegevoegd, er vonden kleine wijzigingen in de lay-out en tekst plaats.

Herziening december 2012
Ir. Marieke van der Laan

Inhoudsopgave

Inleiding	5
1. Gebouw en licht	6
1.1. Wat is licht?	7
1.2. De lichtbron	10
1.2.1. Lichtstroom	11
1.2.2. Lichtrendement	12
1.2.3. Lichtsterkte	13
1.3. De weg	14
1.3.1. Reflectiefactor	15
1.3.2. Absorptiefactor	17
1.3.3. Doorlatingsfactor	17
1.3.4. Verlichtingssterkte	19
1.3.5. Luminantie	20
1.4. Relaties tussen de grootheden	22
1.5. Samenvatting van belangrijkste verlichtingsgrootheden	24
2. Mens en Licht	25
2.1. Het oog	25
2.2. Het zien	26
2.2.1. De spectrale ooggevoeligheid	26
2.2.2. Adaptatie	30
2.2.3. Contrasten	32
2.2.4. Verblinding	33
2.2.5. Oogbewegingen	34
2.2.6. Kleur	35
2.2.7. Gezichtsscherpte	36
3. Ontwerpen met licht	38
3.1. Bouwkundige middelen	39
3.2. Het raam	39
3.2.1. Raamgrootte	39
3.2.2. Oriëntatie raam	40
3.2.3. Soort glas	42
3.2.4. Positie en vorm van ramen	43
3.2.5. Raamafscherming	45
3.2.6. Luifels	46
3.2.7. Reflecties en obstructies buiten	47
3.2.8. Afmetingen van de ruimte	48
3.2.9. Kleurgebruik en afwerking van de ruimte	49
3.3. Berekenen van de hoeveelheid daglicht	50
3.3.1. Wat is daglicht?	50
3.3.2. Daglichtfactor	51
3.3.3. De bepaling van de hemelcomponent (d_h)	53
3.3.4. Stippendiagram	55
3.3.5. Radiaaldiagram	56
3.3.6. De externe reflectiecomponent ($d_{e,r}$)	57

3.3.7. De interne reflectiecomponent ($d_{i,r}$).....	57
3.3.8 Bouwbesluit en daglicht	59
3.4. Installatietechnische middelen.....	60
3.4.1. Lampen.....	61
3.5. Het maken van een kunstlichtplan.....	70
3.5.1. De hoeveelheid licht	70
3.5.2. Plaats van de lichtbronnen.....	72
3.5.3. Richting van het licht.....	73
3.5.4. Het bundelen van licht	75
3.5.5. Berekenen van het aantal armaturen.....	77
3.5.6. Software.....	80
4. Literatuur.....	81
4.1. Boeken en Dictaten	81
4.2. Websites.....	81
Bijlage: Werken met Dialux	82

Inleiding

Dit dictaat behandelt de basistheorie rondom verlichting. Hoofdstuk 1 heet "Gebouw en licht". Hierin wordt de basistheorie behandeld met de bijbehorende symbolen en formules. In hoofdstuk 2 "Mens en licht" wordt kort weergegeven wat de invloed van licht is op de mens en zijn waarnemingen. In het laatste hoofdstuk wordt ingegaan over het ontwerpen met licht.

1. Gebouw en licht

In de architectuur bestaat een indeling voor het beschrijven van de verlichting, gebaseerd op een beoordeling van de kwaliteit in drie termen te weten Functie, Vorm en Sfeer.

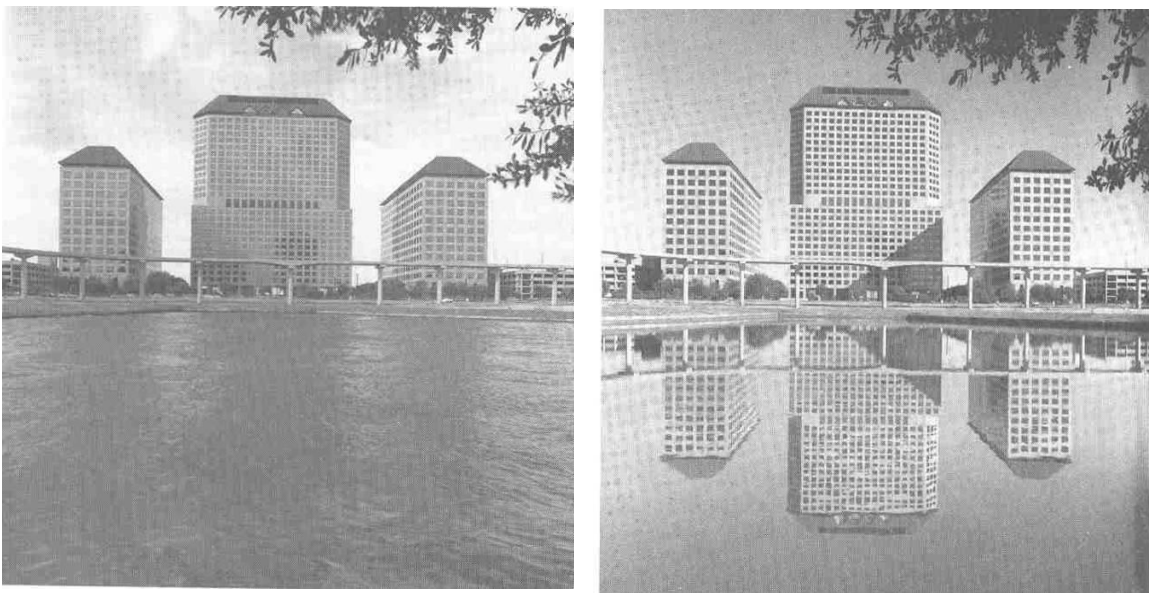
Functie

Onder deze term verstaan we de functionele aspecten van het licht. Het verrichten van lees, schrijf of andere bezigheden vragen ieder om een eigen verlichting en verlichtingseis. Daarnaast zijn er ook eisen die aan verlichting worden gesteld van de openbareruimte uit oogpunt van veiligheid.

De functionele eisen die we aan licht stellen kunnen we redelijk goed vastleggen in getallen en verhoudingen. De aanbevolen waarden voor verlichting zijn in Nederland vastgelegd in de NEN-bladen (b.v. NEN 3087 'Visuele ergonomie in relatie tot verlichting - principes en toepassingen' en NEN-EN 12464-1 'Light and Lighting - Lighting of work places'). Daarnaast kennen we de ARBO-wet (Arbeidsomstandighedenwet) die als doel heeft de veiligheid, gezondheid en het geestelijk en lichamelijk welzijn van de werkende mens te bevorderen. In de wet zijn verlichtingseisen opgenomen. Momenteel worden de verlichtingsnormen steeds meer in Europees verband vastgelegd.

Vorm

Onze fysieke wereld bestaat uit objecten die zichtbaar worden door licht dat op deze objecten valt en vervolgens ons oog bereikt. Het licht geeft ons informatie over de vorm van deze objecten, hun kleur en textuur. Het beeld dat we van deze objecten vormen is sterk afhankelijk van de wijze waarop het licht er op valt.



Figuur 1 Effecten van daglicht op vorm en architectuur

Sfeer

De kleur en de hoeveelheid licht in een ruimte kunnen bij de gebruiker direct associaties oproepen. Als een ruimte verlicht wordt met veel blauwachtig licht, wekt dat bij ons een koele indruk. Het type licht en het lichtplan bepalen hoe we een ruimte ervaren. Zo heeft een goedkope supermarkt vaak veel kunstlicht maar van een mindere lichtkwaliteit. In een dure delicatessewinkel daarentegen is het gemiddelde lichtniveau doorgaans veel lager. Door het toepassen van veel spotlichten met grote contrasten worden onze zintuigen extra geprikkeld, waardoor we de ruimte interessanter vinden. Hierdoor associëren we dergelijke winkels met 'duur'.

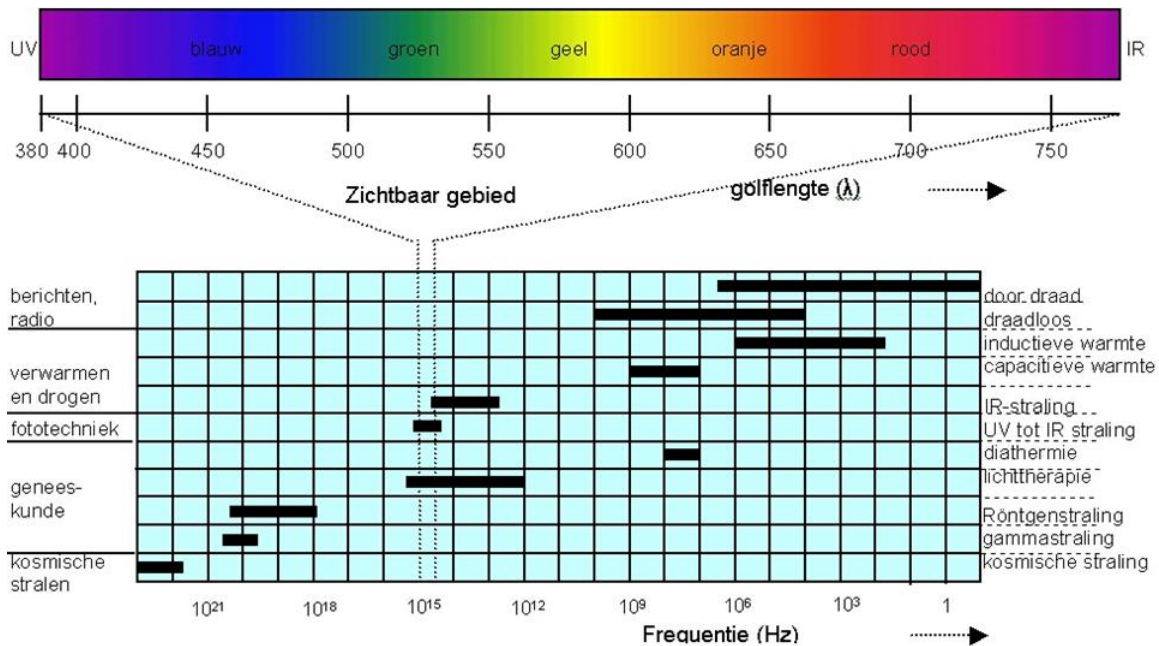
1.1. Wat is licht?

Licht is de stralingsenergie waar het menselijke oog gevoelig voor is en die een visuele prikkel opwekt.

Licht kan op twee fundamenteel verschillende wijzen worden beschreven:

1. Als een (elektromagnetisch, EM) golfverschijnsel.
2. Als een stroom van voortvliegende energiepakketjes (fotonen).

Voor de verlichtingskunde is het gebruikelijk het licht als een elektromagnetisch golfverschijnsel op te vatten. Andere voorbeelden van elektromagnetische golven zijn radiogolven, warmtestraling en röntgenstraling.



Figuur 2 Licht is een van de vele vormen van EM-straling

De verschillende golflengtes (λ) binnen het EM-spectrum hebben in vacuüm alle dezelfde voortplantingssnelheid ($v = 299.793 \text{ km/s}$). Op bijvoorbeeld de mens hebben ze verschillende uitwerkingen. Hier zijn we vooral geïnteresseerd in EM-straling met golflengten tussen de 380 en 780 nm. Dat zijn namelijk de golflengten waarvoor het menselijk oog gevoelig is. EM-straling in dit golflengtegebied noemen we licht. Aan dit spectrum grenst aan de linkerkant ultraviolette straling en aan de rechterkant infraroodstraling. Over deze drie gebieden het volgende.

1. Licht (380-780 nm). Elke golflengte in dit gebied vertegenwoordigt een bepaalde kleur (500 nm is groen licht en 700 nm is rood licht), dit is monochromatisch licht. In het continue spectrum van wit licht, zoals dat van het daglicht, zijn alle kleuren aanwezig. Dit noemen we polychromatisch licht (poly = veel, chroma = kleur). Dit kan zichtbaar gemaakt worden door een daglichtbundel door een prisma te sturen. De bundel wit licht wordt gebroken en alle kleuren van het spectrum worden zichtbaar (regenboog).
2. Ultraviolette straling (250-380 nm). Voor dit gedeelte van het spectrum is het oog niet gevoelig. Het is wel verantwoordelijk voor de kleuring van de huid als we in de zon zitten. Toch speelt het ook een rol in de verlichtingstechniek. Het kan namelijk omgezet worden in licht. Dit proces vindt bijvoorbeeld plaats in zogenoemde fluorescentiebuizen (TL-verlichting); ultraviolette straling wordt opgewekt en door een fluorpoeder, aan de binnenwand van de glazen buis, omgezet in licht.
3. Infrarode straling ($780\text{-}10^6 \text{ nm}$). Ook voor deze straling is het oog niet gevoelig maar infrarode straling is wel voelbaar als warmte, wanneer het op ons lichaam valt. Overigens geldt dat ook voor licht. Dit wordt namelijk deels aan onze huid geabsorbeerd en op die manier omgezet in warmte. Alle lichtbronnen, waaronder de zon, stralen naast licht ook andere golflengtes uit (zoals bijvoorbeeld infrarood).

Alle materie met een temperatuur die hoger is dan het absolute nulpunt (0 Kelvin) zendt elektromagnetische straling uit (thermische straler). Dit noemen we *emittantie* (symbool M). De emittantie wordt onderscheiden in lichtemittantie (het zichtbare deel van het EM-spectrum, $380 < \lambda < 780 \text{ nm}$) en stralingsemittantie ($0 < \lambda < \infty$).

Nu we de fysische achtergrond van licht enigszins kennen, kunnen we ons afvragen wat deze kennis betekent voor de praktijk.

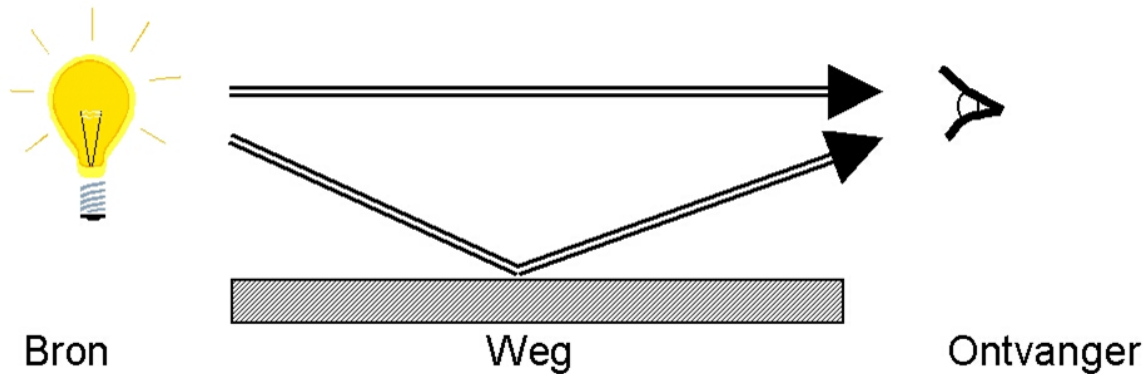


Figuur 3 In rokerige ruimtes is de bundel van het licht zichtbaar

Allereerst moeten we vaststellen dat licht slechts zichtbaar is als het op ons oog valt. De weg waarlangs het licht gaat is in principe niet waarneembaar. Toch denken we lichtstralen te kunnen zien. Dit komt omdat ze op hun weg deeltjes ontmoeten (stof, rook) die het licht weerkaatsen waardoor het licht ons oog bereikt.

Het zien kunnen we beschrijven als een proces waarin we onderscheid maken tussen:

1. De bron
2. De weg
3. De ontvanger (het oog)



Figuur 4 Het proces van zien

In de rest van hoofdstuk 1 behandelen we de bron en de weg. In hoofdstuk 2 gaan we in op de ontvanger (oog). Allereerst beschouwen we de lichtbron.

1.2. De lichtbron

In dit dictaat behandelen we de 2 belangrijkste bronnen van licht:

1. zon (het daglicht);
2. lamp (het elektrische licht).

Onder de zon als lichtbron verstaan we zowel het directe licht van de zon, als het indirecte licht dat via de atmosfeer en de wolken de aarde bereikt. Met de lamp bedoelen we het licht dat ontstaat door het omzetten van elektrische energie in licht (b.v. gloeilamp, TL-lamp etc).

De grote verschillen in gebruik en toepassing tussen daglicht en kunstlicht zijn de volgende:

Daglicht

- is dynamisch wat betreft de grote kleur- en hoeveelheidsvariatie;
- heeft een zeer goede kleurkwaliteit, vanwege het continue spectrum;
- treedt een ruimte binnen via openingen in de uitwendige scheidingsconstructies;
- is qua hoeveelheid en soort licht afhankelijk van de oriëntatie, positie en de afmetingen van deze openingen.

Kunstlicht daarentegen

- heeft meestal een statisch karakter wat betreft de hoeveelheid licht en de kleur;
- heeft in veel gevallen niet een continu spectrum waardoor niet alle kleuren even goed worden weergegeven (zie 3.4.1.);
- wordt vaak in of aan het plafond geplaatst;
- heeft meestal een klein helder oppervlak;
- is wat betreft het effect ervan op een ruimte van tevoren exact te bepalen.

Een ruimte die verlicht wordt met daglicht heeft een dynamisch karakter doordat het daglicht continu fluctueert onder invloed van de meteorologische omstandigheden en de tijd. Ook uit energetisch en dus kosten oogpunt proberen we in leef- en werkruimtes zo veel mogelijk gebruik te maken van daglicht. In tegenstelling tot het effect dat daglicht op een ruimte heeft kan van tevoren exact berekend en bepaald worden wat het effect van kunstlicht is. Door het grote aanbod aan lichtbronnen en verlichtingsarmaturen (omhulsel waar de lichtbron in geplaatst wordt en die het licht een richting geeft) kan vrijwel elk gewenst resultaat bereikt worden.

In de werksituatie wordt meestal een combinatie gemaakt van daglicht en kunstlicht, waarbij het kunstlicht overdag het gebrek aan voldoende daglicht compenseert.

De verlichtingsgrootheden die we in de volgende paragrafen behandelen hebben zowel betrekking op daglicht als op kunstlicht.

1.2.1. Lichtstroom

LICHTSTROOM



Φ

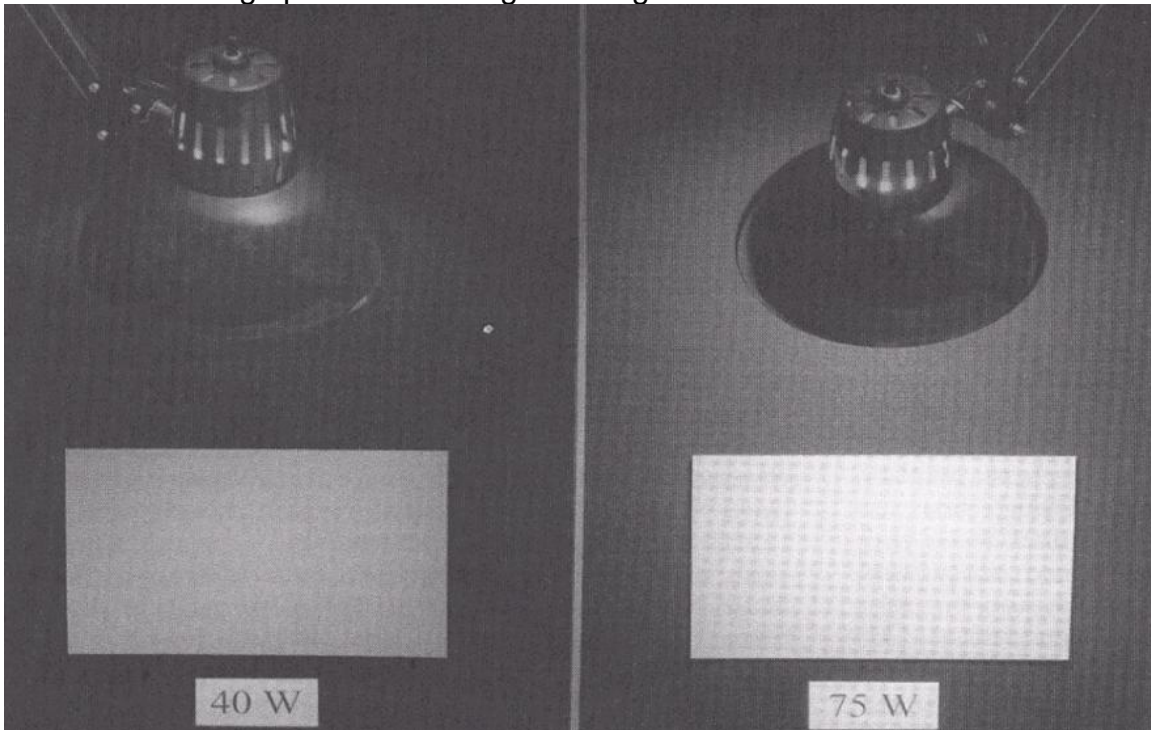
Hoeveelheid energie die per seconde door een lichtbron in alle richtingen wordt uitgestraald, gewogen tegen de spectrale ooggevoeligheidskromme.

$$\Phi = Q_v / t \quad \begin{array}{l} Q_v = \text{lichtenergie (lm*s)} \\ t = \text{tijd (s)} \end{array}$$

Eenheid : **lumen (lm)**

Figuur 5 Lichtstroom

Zoals we in paragraaf 1.1. opgemerkt hebben, zendt elk voorwerp elektromagnetische straling uit. Het deel van het spectrum dat voor het menselijke oog zichtbaar is noemen we licht. De hoeveelheid licht die per tijdseenheid wordt uitgezonden noemen we in de verlichtingskunde de *lichtstroom* (Φ , hoofdletter phi) met als eenheid de lumen. De meer precieze definitie van lichtstroom is: de uitgestraalde hoeveelheid stralingsenergie per seconde welke wordt gewogen naar de spectrale gevoeligheid van het oog. Het oog blijkt namelijk niet even gevoelig te zijn voor elke golflengte van het lichtspectrum. In paragraaf 2.2.1 'De spectrale ooggevoeligheid', volgen een nadere toelichting op en de afleiding van de grootheid 'lichtstroom'.



Figuur 6 Verschil in lichtstroom

1.2.2. Lichtrendement

Het *lichtrendement*, oftewel de specifieke lichtstroom van een lichtbron, wordt uitgedrukt in lumen per watt. Dit is de hoeveelheid uitgezonden licht per opgenomen vermogen. Zo produceert bijvoorbeeld een gloeilamp van 75 W een lichtstroom van 900 lumen en een van 40 W er een van 415 lumen. Een spaarlamp heeft maar 15 W nodig om een lichtstroom uit te zenden van 900 lumen. Het vermogen van een lamp geeft dus geen uitsluitsel over de lichtstroom. Het hoogst denkbare rendement is overigens 670 lm/W (zie paragraaf 2.2.1.). Dat de lichtopbrengst van veel lichtbronnen nog al wat lager is, wordt veroorzaakt door:

1. Veel van het opgenomen vermogen wordt direct omgezet in warmte (de lamp wordt warm).
2. Er wordt ook EM-straling uitgezonden waar het oog helemaal niet gevoelig voor is (b.v. UV en IR)
3. De relatieve spectrale ooggevoeligheid $V(\lambda)$ (het oog is niet voor alle golflengten even gevoelig).

Voor dezelfde lichtstroom gebruikt een spaarlamp dus veel minder energie dan een gloeilamp; door een gloeilamp wordt zo'n 9% van de opgenomen energie omgezet in licht, terwijl dit voor een fluorescentielamp (onder de fluorescentielampen vallen onder andere spaarlampen en TL-buizen) zo'n 20% is.

Bij zonnestraling kunnen we ook spreken van een lichtrendement. Dit is voor directe zonnestraling ongeveer 80 lumen/W. Het rendement van het diffuse deel van het daglicht is veel hoger (ongeveer 115 lumen/W). Dit komt onder meer doordat het aandeel IR veel minder groot is.

Tabel 2.1. Lichtrendement van enkele lichtbronnen.

Soort lamp	Lichtrendement
Gloeilamp 20 W	12 lm/W
Gloeilamp 60 W	15 lm/W
Halogeenlamp	22 lm/W
LED verlichting	40 lm/W (varieert van 25→80 lm/W!)
Spaarlamp 18 W	61 lm/W
Fluorescentielamp TL36W/830	93 lm/W
Direct zonlicht	80 lm/W
Diffuus zonlicht	115 lm/W

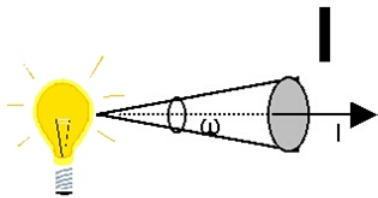
exclusief vermogensverlies van het voorschakelapparaat (≈10% van het lampvermogen)

1.2.3. Lichtsterkte

De in paragraaf 1.2.1. geïntroduceerde lichtstroom vertelt ons alleen hoe groot de totaal door een lichtbron uitgestraalde lichtstroom is. Om te kunnen aangeven hoe groot de lichtstroom in een bepaalde richting is gebruiken we de grootheid *lichtsterkte*. Dat is de lichtstroom per eenheid van ruimtehoek die in die bepaalde richting wordt uitgestraald.

Het symbool dat hierbij hoort is I (hoofdletter i), met als eenheid candela (cd). 1 candela = 1 lumen per steradiaal.

Lichtsterkte



De lichtstroom per eenheid van ruimtehoek die in een bepaalde richting wordt uitgestraald.

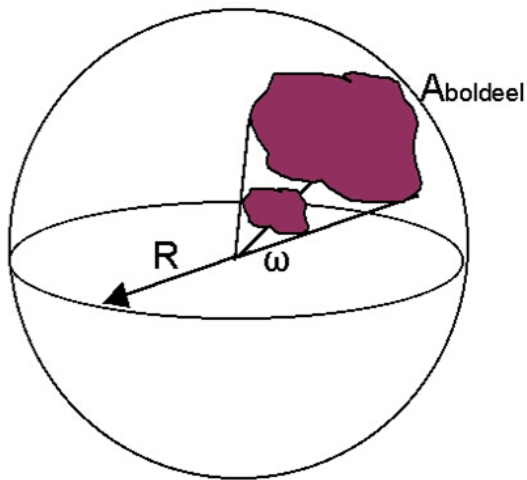
Eenheid : **candela (cd)**

$$I = \Phi/\omega$$

Figuur 7 Lichtsterkte

Om de *ruimtehoek*, dit is de ruimte binnen een kegel van willekeurige vorm, te definiëren, wordt een bol met straal R geslagen rond de top van de kegel. Het door de kegel uit de bol gesneden oppervlak noemen we A_{boldeel} . De ruimtehoek (ω) is gelijk aan A_{boldeel}/R^2 (figuur 2.10.). De eenheid hiervan is de steradiaal (sr) (ter vergelijking; in het twee dimensionale, platte vlak noemen we dit radialen). De grootte van de ruimtehoek is niet afhankelijk van de vorm van de uitsnijding die op het boloppervlak wordt gemaakt, maar alleen van de oppervlakte van de uitsnijding. Aangezien de oppervlakte van een bol gelijk is aan $4\pi R^2$ is een ruimtehoek die de gehele ruimte beslaat gelijk aan 4π steradianen (want $4\pi R^2/R^2$). Uit het voorgaande blijkt ook dat bij de definitie die het verband tussen lichtsterkte en lichtstroom beschrijft in wezen wordt uitgegaan van een puntvormige lichtbron, met een 'oneindig kleine' afmeting. In de praktijk hebben alle lichtbronnen echter eindige afmetingen. Dit vormt echter geen probleem, zolang de straal van de denkbeeldige bol die om de lichtbron wordt geslagen maar vele malen groter is dan de afmetingen van de lichtbron. Voor lijnvormige lichtbronnen kan de specifieke richting overigens niet als onderdeel van een bol omschreven kunnen worden.

$$\omega = A_{\text{boldeel}}/R^2$$



Ruimtehoek is dat deel van de ruimte dat, vanuit een punt uitwaaiende bundel, door rechtlijnige stralen wordt bestreken.

De grootte van zo'n ruimtehoek wordt aangegeven door de verhouding tussen grootte van het oppervlak uitgesneden uit een bol om de oorsprong van de stralenbundel (A_{boldeel}) en het kwadraat van de straal van die bol (R^2).

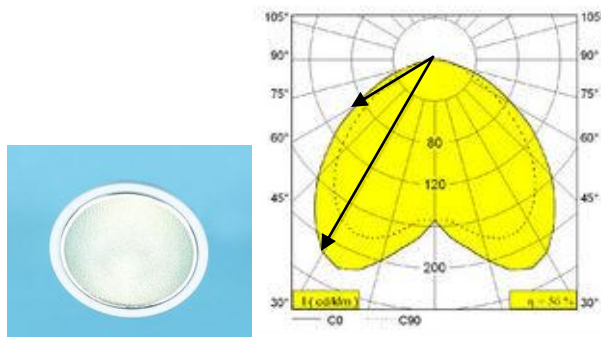
Voor kleine ruimtehoeken wordt het uitgesneden boloppervlak benaderd door een plat vlak.

Figuur 8 Ruimtehoek ω

Voorbeeld 1: Een op de vloer gericht spotje veroorzaakt een ronde lichtvlek op de vloer met een oppervlak van $0,5 \text{ m}^2$. Het spotje hangt $2,5 \text{ m}$ boven de vloer. Het spotje straalt licht uit in een **ruimtehoek** $\omega = A_{\text{boldeel}}/R^2 = 0,5 / (2,5)^2 = 0,08$ sterradiaal.

Een hele bol beslaat 4π ($\approx 12,56$) sterradiaal, dus het spotje straalt licht uit in slechts een heel klein deel daarvan (smalle bundel).

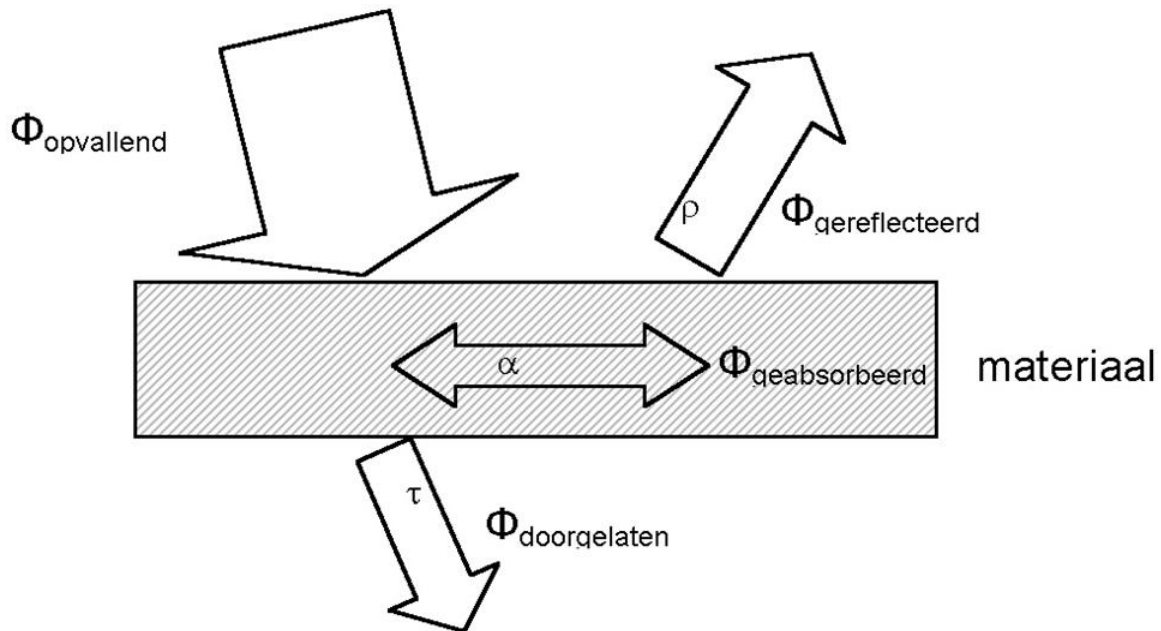
Voorbeeld 2: Het begrip **Lichtsterkte** kom je in de praktijk o.a. tegen in de lichtsterkte-diagrammen die fabrikanten gebruiken om de eigenschappen van hun lampen te beschrijven: De lichtsterkte van een lamp in verschillende richtingen (\rightarrow bijvoorbeeld (in een heel klein ruimtehoekje) in de richting 30° of 60° met de vertikaal, zoals de pijlen hieronder aangeven)



Figuur 8a. Het lichtsterkte diagram van een "downlighter"

1.3. De weg

Wat gebeurt er nu met de visuele indruk van een ruimte als er een lichtbron in geplaatst wordt? De lichtstroom die uitgestraald wordt door de lichtbron zal zich gaan 'verdelen' over de ruimte. De ruimte wordt pas zichtbaar als het licht via de omgevingsoppervlakken (wanden, vloer en plafond) op ons oog valt. Het licht dat op een vlak valt, zal voor een deel gereflecteerd en voor een deel geabsorbeerd worden.



Figuur 9 Licht valt op een vlak

Sommige materialen kunnen het licht ook nog doorlaten. Deze materialen noemen we lichtdoorlatend. Altijd geldt:

$$\rho + \alpha + \tau = 1$$

ρ = reflectiefactor [-]

α = absorptiefactor [-]

τ = doorlatingsfactor [-]

Alle drie de factoren zijn afhankelijk van de invalshoek en de golflengte van het licht. Toch wordt meestal met vaste waarden gewerkt. Deze zijn in het laboratorium bepaald voor 'standaard' daglicht dat in een parallelle bundel loodrecht op het oppervlak van het materiaal valt.

1.3.1. Reflectiefactor

Om een vlak te kunnen zien moet minstens een deel van het erop vallende licht gereflecteerd worden (en op ons oog vallen). Een wit vlak reflecteert (grotendeels) alle golflengten (bijvoorbeeld $\rho = 0,9$ en $\alpha = 0,1$). Een zwart vlak

reflecteert alle golflengten juist in zeergeringe mate (bijvoorbeeld $\rho = 0,1$ en $\alpha = 0,9$).

In bovenstaande gevallen worden alle golflengten van het witte licht gereflecteerd. Is dit niet het geval dan zien we het vlak in een kleur. Als bijvoorbeeld alleen de golflengte rood wordt gereflecteerd, en de rest geabsorbeerd, zien we het vlak als rood. Natuurlijk kunnen ook meerdere golflengten gereflecteerd worden en andere geabsorbeerd. We krijgen dan een mengkleur.

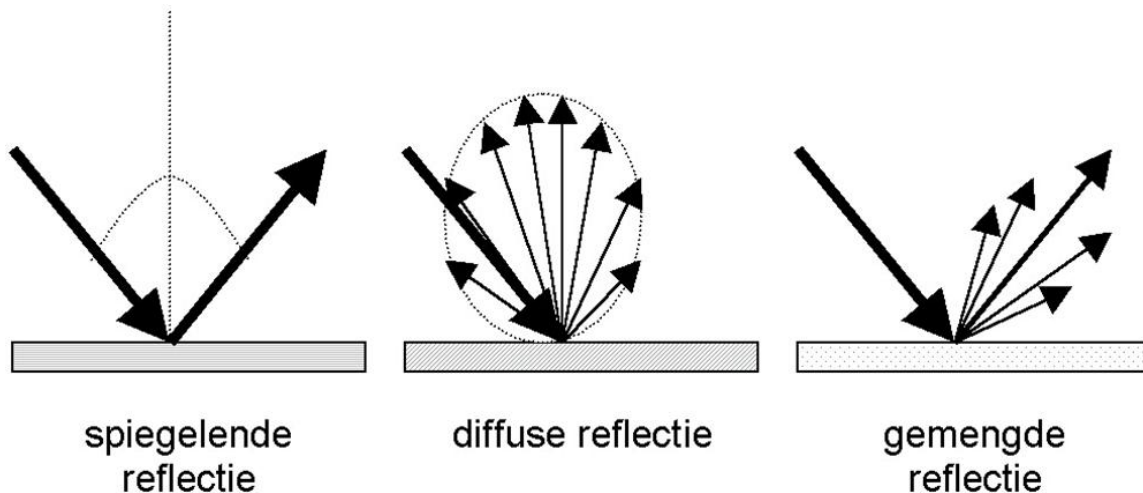
Een vlak kan nooit de kleur krijgen met een golflengte die niet in het erop vallende licht voorkomt. Zo kleurt licht van een natriumlamp (monochromatisch geel) een rode auto zwart. Voor een goede kleurweergave is licht nodig waarin alle golflengten voorkomen. Zonlicht heeft deze eigenschap.

Tabel 2.2. Reflectiefactoren [ρ] voor enkele materialen.

Materiaal	Reflectiefactor ρ [-]
Nieuw wit pleisterwerk	0,7 – 0,8
Beton	0,05 – 0,5
Baksteen	0,05 – 0,3
Kalksteen	0,35 – 0,55
Licht berkenhout	0,55 - 0,65
Donker gelakt mahoniehout	0,15 – 0,4
Melkglas	0,4 -0,6
Zilver	0,88 - 0,93
Wit papier	0,7 - 0,8
Verse sneeuw	0,65
Vochtige aarde	0,07
Gras	0,06 – 0,25

Hoe het licht gereflecteerd wordt, hangt af van de aard van het oppervlak. Bij reflectie door een spiegel geldt dat de hoek van inval gelijk is aan de hoek van terugkaatsing.

Een vlak kan het licht ook diffuus reflecteren. Dit houdt in dat de opvallende lichtbundel het licht in alle richtingen zal reflecteren. Denk bijvoorbeeld aan een velletje wit papier. Tussen een compleet spiegellend vlak en een compleet diffuus vlak zijn vele mengvormen mogelijk, zoals die van gepolijst marmer of een glanzend geverfd oppervlak. Merk op dat de reflectiefactor in feite niets zegt over vorm van reflectie, alleen over het deel van het opvallende licht dat weerkaatst wordt.



Figuur 10 Reflectievormen

1.3.2. Absorptiefactor

Absorptie is de keerzijde van reflectie. Altijd zal een deel van het opvallende licht geabsorbeerd worden door het oppervlak. Met veel absorptie doet een oppervlak zich als donker voor, met veel reflectie als helder. Bij absorptie van EM-straling door een oppervlak wordt stralingsenergie omgezet in inwendige energie, dus in warmte. Het oppervlak stijgt in temperatuur. Denk bijvoorbeeld aan zonnestraling die op een vlak valt. Het maakt daarbij niet uit of het zichtbare of onzichtbare EM-straling betreft; allebei zorgen ze voor temperatuurstijging.

1.3.3. Doorlatingsfactor

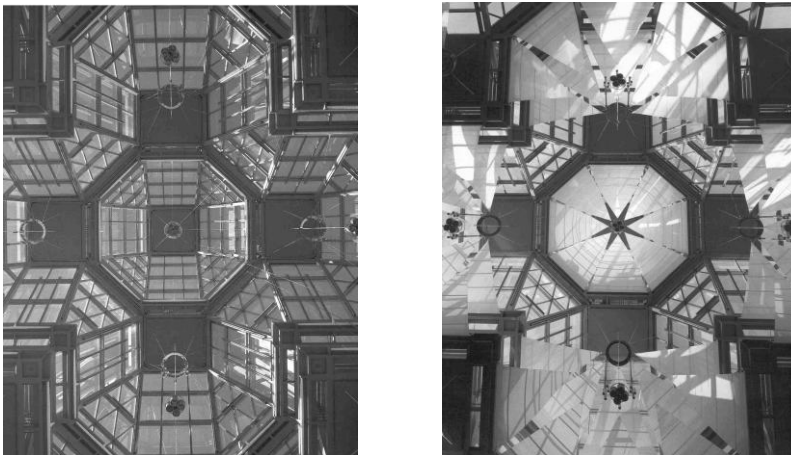
Sommige materialen laten licht door; naast absorptie en reflectie wordt een deel van het licht doorgelaten. We noemen zo'n materiaal transparant als we erdoor kunnen kijken zonder dat het beeld onscherp wordt. We noemen het translucient als het wel licht doorlaat maar we er niet (goed) doorheen kunnen kijken. Het licht wordt verstrooid in het materiaal. Een voorbeeld hiervan is melkglas.

Een term die we in de bouw, en met name in verband met beglazing, nogal eens tegen zullen komen, is de LTA- waarde van transparante materialen. Hieronder verstaan we het percentage van het licht dat overblijft als het door een lichtdoorlatend oppervlak gaat. Omdat we van een vlak vaak niet alleen de lichtdoorlatendheid willen weten maar voor het berekenen van warmtetransport door het materiaal ook de warmtedoorlatendheid, vinden we het belangrijk om ook de ZTA-waarde van een materiaal te kennen. Dit staat voor de zontoetredingsfactor en wordt omschreven als het percentage zonne-energie dat door dat materiaal treedt.

Tabel 2.3. Doorlatingsfactoren (τ) voor enkele materialen.

Soort glas	Doorlatingsfactor τ [-]
Helder glas	0,92
Melk glas	0,10 - 0,38
Wit perkament	0,35 - 0,55
Helder dubbel glas	0,70 - 0,84
Glazen bouwstenen	0,30 - 0,60
Dun karton of zijde	0,30 - 0,70

Een mooi voorbeeld waar alle drie de factoren duidelijk naar voren komen is onderstaande foto van het atrium in de National Gallery of Canada (Toronto). Op de linkerfoto kijken we via het glas rechtstreeks naar buiten (transparant). Het merendeel van het opvallende daglicht wordt doorgelaten (afhankelijk van de doorlatingsfactor van het toegepaste glas). Worden er nu katoenen doeken onder het glas gehangen, dan zal een minder groot deel van het daglicht doorgelaten worden. Een deel van het licht wordt weer teruggereflecteerd naar buiten. Tenslotte zal een deel van het opvallende licht worden omgezet in warmte. Het deel dat geabsorbeerd wordt.

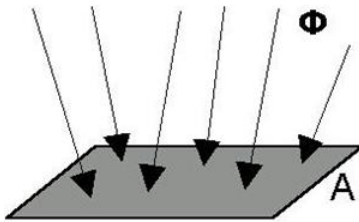


Figuur 11 National Gallery of Canada

1.3.4. Verlichtingssterkte

De grootheid die het meest gebruikt wordt in de verlichtingskunde is de *verlichtingssterkte*. Onder verlichtingssterkte verstaan we de lichtstroom per eenheid van oppervlakte die door een vlak wordt ontvangen. Het symbool hiervoor is E en de eenheid is de lux. Eén lux is gelijk aan 1 lumen per vierkante meter.

Verlichtingssterkte



E

De verlichtingssterkte is de lichtstroom per eenheid van oppervlakte die door een vlak wordt ontvangen.

Eenheid : lux (lx)

$$E = \Phi/A$$

Figuur 12 Verlichtingssterkte

De verlichtingssterkte is onafhankelijk van de richting waaruit de lichtstroom het vlak bereikt. De verlichtingssterkte zegt niets over de kwaliteit van het licht, maar slechts over de hoeveelheid. Om een indruk te krijgen van de grootte van de toegepaste eenheid, staan in tabel 4 de verlichtingssterktes van enkele specifieke situaties. Daar zien we dat de verlichtingssterkte fors varieert.

Tabel 2.4. Verlichtingssterktes van onze omgeving op 't horizontale vlak.

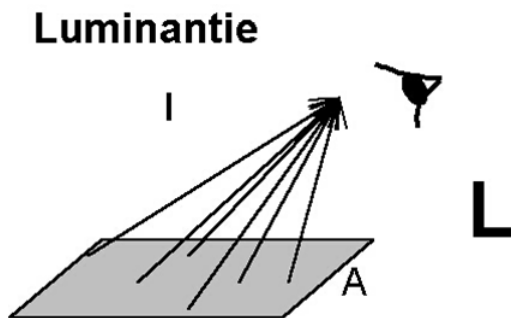
Hemeltoestand	Verlichtingssterkte horizontaal
Onbewolkte zomerdag in de zon	100.000 lux
Zwaar bewolkte hemel	5.000 lux
Normaal kantoor	200-800 lux
Heldere nacht, volle maan	0,25 lux

De reden waarom er het meest met de verlichtingssterkte gewerkt wordt, is dat met redelijk eenvoudige berekeningen snel een indruk gegeven kan worden over de hoeveelheid licht in een ruimte. De verlichtingssterkte is een grootte voor de totale hoeveelheid licht die op een vlak valt. Het materiaal kan het licht reflecteren, absorberen of doorlaten. Als er slechts een klein gedeelte van het opvallende licht wordt gereflecteerd, betekent dit dat er ook maar een klein deel op ons netvlies terecht zal komen. Eigenlijk is het daarom beter om informatie te hebben over de hoeveelheid licht die uiteindelijk, via de reflectie, ons oog bereikt (zie paragraaf 1.4.3.). Maar omdat oogtaken vaak lezen vanaf wit papier betreffen, kunnen we, door te rekenen met de verlichtingssterkte, toch een goede inschatting maken of er voldoende licht is.

1.3.5. Luminantie

De verlichtingsgrootte die we het laatst behandelen is de **luminantie**. Hij speelt een belangrijke rol in de waarneming van de omgeving. Samen met kleur(verschil) zorgen **helderheidsverschillen** in onze omgeving ervoor dat we die omgeving kunnen waarnemen. Een boek kunnen we lezen dankzij het helderheidsverschil tussen de zwarte letters en het witte papier.

De natuurkundige grootte waarmee we de helderheid van een vlak kunnen beschrijven is de luminantie. De luminantie wordt gemeten in cd/m^2 . De *luminantie* van een oppervlak, gezien vanuit een bepaald punt, is de lichtstroom, uitgestraald door dat oppervlak in de richting van dat punt per ruimtehoek en per eenheid van schijnbaar oppervlakte. Dat vraagt om enige toelichting. Het oppervlak kan een lichtbron zijn zoals een TL-buis of een lichtdoorlatend lichaam als een matglazen bol om een gloeilamp. Maar het kan ook een lichtreflecterend oppervlak zijn. Per eenheid van *schijnbaar oppervlak* betekent dat het oppervlak gerekend wordt zoals dat vanuit het punt van waarneming (meting) gezien wordt. Meet ik de luminantie van een mat papieren A4-tje er loodrecht boven dan blijkt die even groot te zijn als wanneer ik die onder een hoek meet. Dit komt overeen met onze ervaring; van welke richting ik ook naar het papier kijk, de helderheid is steeds dezelfde. Fysisch uitgedrukt: De luminantie is de lichtsterkte in de richting van het punt van waarneming gedeeld door het schijnbaar oppervlak. Dit quotiënt is voor een diffuus reflecterend vlak in alle richtingen gelijk.



Figuur 13 Luminantie van een vlak

De luminantie is de lichtsterkte, per eenheid van het schijnbaar oppervlak, die in een bepaalde richting wordt uitgestraald.

Eenheid : cd/m^2

$$L = I/A_{\text{schijnbaar}}$$

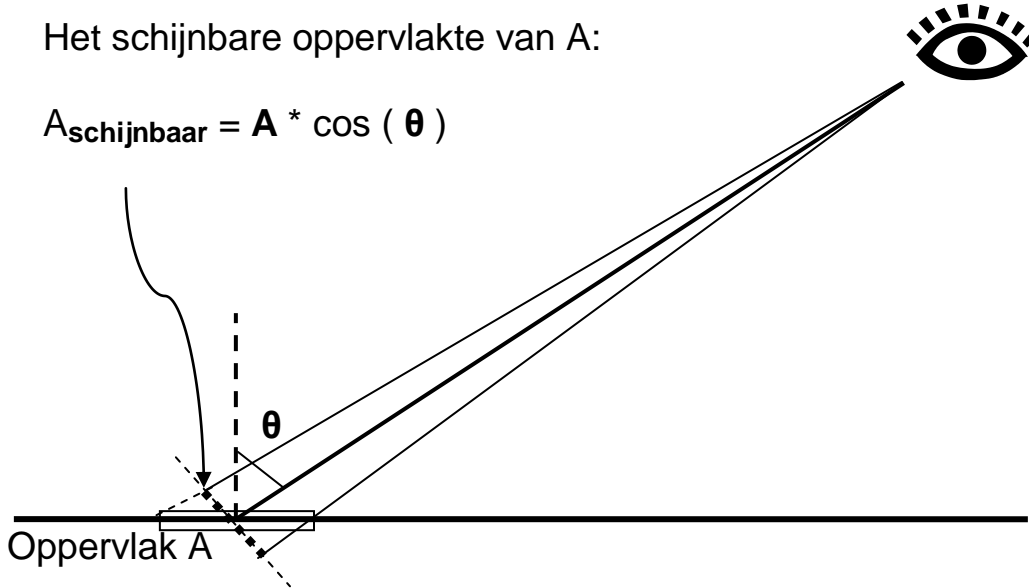
Waarbij het schijnbaar oppervlak $A_{\text{schijnbaar}}$ wordt gezien als in figuur 14.

Voorbeeld: Een A-viertje ($A = 0,3 \times 0,21 = 0,063 \text{ m}^2$) wordt bekeken onder een hoek van 45° .

Vanuit *die* gezichtshoek *lijkt* het oppervlak maar $A_{\text{schijnbaar}} = A \cdot \cos \theta = 0,063 \cdot \cos (45) = 0,045 \text{ m}^2$ groot. Zie figuur 14.

Het schijnbare oppervlakte van A:

$$A_{\text{schijnbaar}} = A * \cos(\theta)$$



Figuur 14 Schijnbare oppervlakte (voorwerp gezien vanuit verschillende richtingen)

Men kan onderscheid maken tussen lichtbronnen die zelf licht genereren, de zogenaamde primaire lichtbronnen zoals de zon of een gloeilamp, en vlakken die licht reflecteren dat zij van elders ontvangen, de zogenaamde secundaire lichtbronnen. In plaats van luminantie wordt ook wel eens 'helderheid' gezegd. Met beide begrippen doen we een uitspraak over dezelfde kwaliteit. Er is echter verschil. Helderheid is spreektaal en een subjectieve kwalificatie. Helderheid is wat je ziet en hangt mede af van de adaptatietoestand van het oog. Luminantie is een natuurkundige grootheid en is dus meetbaar.

Tabel 2.5. Enkele specifieke luminanties.

Bronnen	Luminanties
Zon	$1,65 * 10^9 \text{ cd/m}^2$
Pijngrens	$1 * 10^5 \text{ cd/m}^2$
Wit papier ($\rho=0,8$ en $E= 400 \text{ lux}$)	100 cd/m^2
Maanoppervlak	$0,01 \text{ cd/m}^2$
Gezichtsdrempel	$1 * 10^{-5} \text{ cd/m}^2$

Oppervlaktes met verschillende reflectiefactoren zullen, bij dezelfde verlichtingssterkte verschillende luminanties hebben.

Met de andere drie grootheden (lichtstroom, lichtsterkte en verlichtingssterkte) kunnen we wat eenvoudiger rekenen. De luminantie zegt echter het meeste over wat er op ons oog terechtkomt en hoe we een ruimte waarnemen.

1.4. Relaties tussen de grootheden

In de vorige paragrafen is een uitleg gegeven over de verschillende verlichtingsgrootheden. Om te kunnen berekenen hoeveel licht er in een ruimte is en hoe het licht zich gedraagt, is het goed om de onderlinge relaties tussen de grootheden te kennen.

1.4.1 De lichtstroom (Φ) in relatie tot de lichtsterkte(I)

Voor een lichtbron die in alle richtingen evenveel licht uitzendt (bijvoorbeeld een matglazen bol) geldt dat de lichtsterkte van die bol gelijk is aan de lichtstroom die uitgezonden wordt door de bron gedeeld door 4π . Immers, de ruimtehoek (ω) van een bol is 4π (zie ook 1.2.3.).

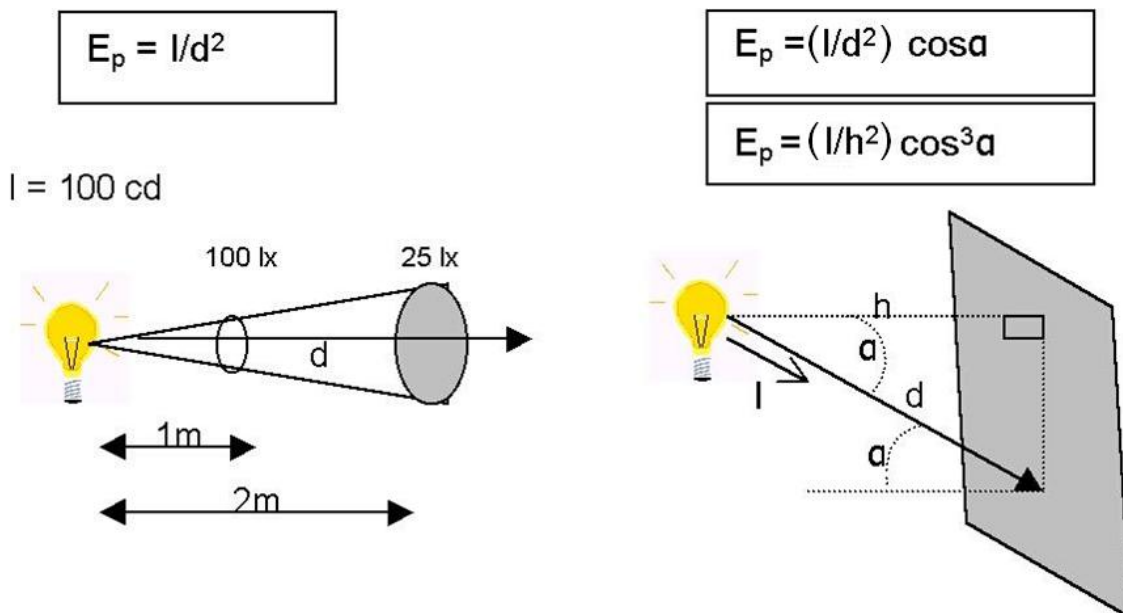
$$I = \frac{\Phi}{4\pi} \quad (\text{bolvormige lichtbron}) \quad [1]$$

Waarin:

I = lichtsterkte [cd]
 Φ = lichtstroom [lm]

1.4.2 De lichtsterkte (I) in relatie tot de verlichtingssterkte (E)

Voor een puntbron geldt dat de verlichtingssterkte kwadratisch afneemt bij het vergroten van de afstand. Dit noemt men de inverse kwadratenwet.



Figuur 15 De inverse kwadratenwet

$$E_p = \frac{I}{d^2} \quad (\text{inverse kwadratenwet - loodrecht}) \quad [2]$$

Waarin:

E_p = verlichtingssterkte in punt p [lux]

I = lichtsterkte [cd]

d = afstand bron tot punt p [m]

Bij bovenstaande vergelijking staat het meetvlak loodrecht op d . Als het meetvlak niet loodrecht op d staat, zal de verlichtingssterkte kleiner zijn naarmate de hoek tussen vlak en d kleiner is. We kunnen dit verband schrijven als:

$$E_p = \left[\frac{I}{d^2} \right] * \cos \alpha = \left[\frac{I}{d^2} \right] * \left[\frac{h}{d} \right] = \frac{I * h}{d^3} \quad (\text{inverse kwadratenwet}) \quad [3]$$

Waarin:

E_p = verlichtingssterkte in punt p [lux]

I = lichtsterkte [cd]

d = afstand bron tot punt p [m]

α = hoek van d met normaalvlak [graden]

h = de loodrechte afstand van de bron tot het vlak [m]

1.4.3 De verlichtingssterkte (E) in relatie tot de luminantie (L)

Bij een volkomen diffuus reflecterend vlak is er een eenvoudige relatie tussen de verlichtingssterkte op dit vlak en de luminantie ervan. De definitie van een volkomen diffuse straler (ook wel 'Lambertstraler' genoemd) is dat de luminantie van deze straler richtingsonafhankelijk is. Hierdoor kunnen we de luminantie van een Lambertstraler berekenen met behulp van de formule

$$L = \frac{E * \rho}{\Pi} \quad (\text{voor een diffuus reflecterend vlak of een diffuus stralend vlak}) \quad [4]$$

Waarin:

L = luminantie [cd/m^2]

E = verlichtingssterkte in een punt van het oppervlak [lux]

ρ = reflectiefactor van het vlak [-]

Een voorbeeld van een diffuus stralend stuk oppervlak is een wit stuk papier of een stuk pleisterwerk. Het licht dat gereflecteerd wordt heeft niet een bepaalde richting.

1.5. Samenvatting van belangrijkste verlichtingsgrootheden.

We zetten de vier belangrijkste verlichtingsgrootheden nog even op een rijtje.

Lichtstroom

De hoeveelheid licht die per seconde door een lichtbron in alle richtingen wordt uitgestraald, gewogen tegen de spectrale ooggevoeligheid.

Lichtsterkte

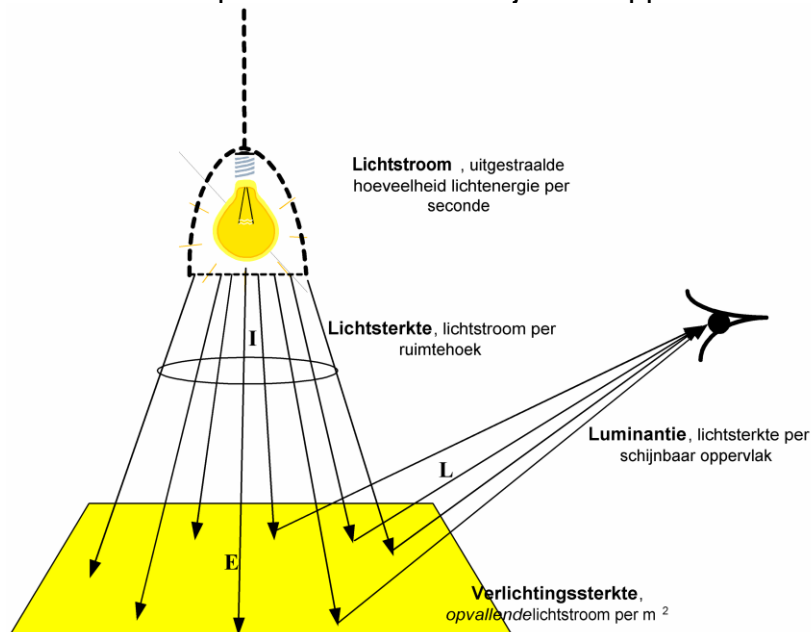
De lichtstroom per eenheid van ruimtehoek die in een bepaalde richting wordt uitgestraald.

Verlichtingssterkte

De lichtstroom per eenheid van oppervlakte die door een vlak wordt ontvangen.

Luminantie

De lichtsterkte per eenheid van schijnbaar oppervlak.



Figuur 16 De vier verlichtingsgrootheden

Tabel 2.6. Verlichtingsgrootheden.

Grootheid			SI eenheid		
Naam	Symbool	Formule	Naam	Symbool	afleiding
Lichtstroom	Φ		Lumen	Lm	
Lichtsterkte	I	Φ/ω	Candela	Cd	Lm/sr
Verlichtingssterkte	E		Lux	Lux	Lm/m ²
Luminantie	L	$I/A_{\text{schijnbaar}}$	Candela per m ²	Cd/m ²	Lm/sr m ²

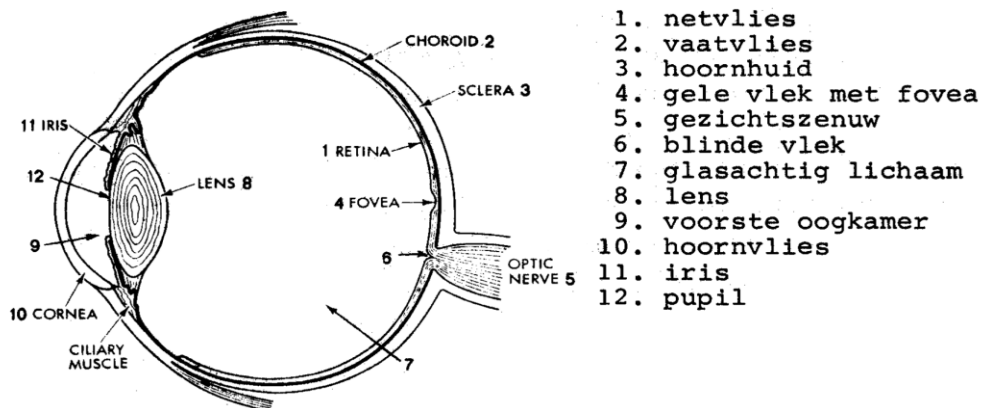
2. Mens en Licht

Licht maakt het mogelijk te zien. Het oog is het zintuig waarmee mensen de meeste informatie over de omgeving krijgen. Zo'n 80% van alle informatie die de hersenen bereikt komt via de ogen binnen.

Als er zich in een compleet afgesloten ruimte geen enkele lichtbron bevindt, is het onmogelijk om een goed beeld te krijgen van die ruimte. Alle aspecten van een ruimte zoals de vorm, de afmetingen, het kleurgebruik en de inrichting worden binnen een fractie van een seconde duidelijk als we kunnen zien. Maar daar is wel licht voor nodig.

2.1. Het oog

Het oog zet licht (waargenomen helderheden) om in elektrische (neurologische) signalen die in de hersenen bewerkt worden tot een beeld van de omgeving. Vlakken en contouren zijn al zichtbaar bij heel kleine hoeveelheden licht. Voor details zoals de textuur van de afwerking en de exacte kleuren is meer licht nodig. Dit heeft te maken met de manier waarop ons oog werkt en informatie doorgeeft aan onze hersenen.



Figuur 17 Doorsnede van het oog

Het oog bevat zowel neurologische als optische delen. De optische delen (hoornvlies, lens, pupil en glasachtig lichaam) zorgen voor de projectie op het netvlies, de binnenkant van het oog, waarin zich lichtgevoelige sensoren bevinden. Deze sensoren sturen de signalen vervolgens weer door naar de hersenen waar ze geïnterpreteerd worden. De lichtgevoelige sensoren zijn te onderscheiden in twee typen: de staafjes (120-130 miljoen per oog) en de kegeltjes (ongeveer 7 miljoen per oog). De spieren rond de lens (cilliaire spieren) kunnen door meer of minder samen te trekken de lens aanpassen. Dit noemen we *accommoderen*. Hierdoor kunnen we voorwerpen op verschillende afstanden scherp zien.

De optische doorlating van het oog is afhankelijk van de golflengte van het licht en de leeftijd van de persoon; naarmate mensen ouder worden neemt de doorlating over het hele spectrum af, waarbij de kortgolvlige kant het hardst terugloopt. Deze afname is vooral het gevolg van de verdikking en vergeling van

de ooglens. Hierdoor zullen oude mensen meer licht nodig hebben om hetzelfde te zien als jonge mensen. Naast de verminderde doorlatendheid van de lens zullen oudere mensen sneller last krijgen van verblinding door licht. Dit verschijnsel treedt op doordat het licht door een vertroebelde lens meer verstrooid wordt in het oog (ook wel sluieluminantie genoemd), maar ook door de verslapping van de oogspieren; de pupilgrootte kan niet meer zo gemakkelijk verkleind worden.

Direct voor de lens bevindt zich de iris die, net als het diafragma van een fotocamera, de hoeveelheid licht doseert die het oog binnenkomt. Als de hoeveelheid licht die op het oog valt toeneemt, verkleint de opening zich en als de hoeveelheid afneemt vergroot zij zich. Dit noemen we adapteren.

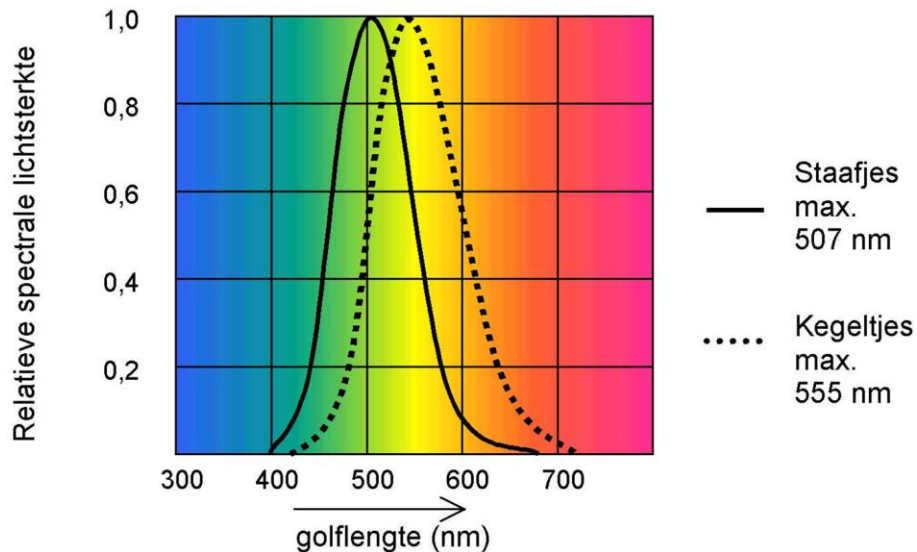
2.2. Het zien

De informatie die via onze ogen binnenkomt wordt direct vertaald en geïnterpreteerd zodat we hierop kunnen reageren. Hieronder wordt een groot aantal facetten van het zien beschreven die direct dan wel indirect met licht te maken hebben.

2.2.1. De spectrale ooggevoeligheid

Voor het visuele lichtbereik van het oog spelen, zoals gezegd, twee typen receptoren een rol.

1. De staafjes zijn zeer lichtgevoelig en kunnen bij zeer lage lichtniveaus vormen en bewegingen onderscheiden. Hoewel de staafjes zelf geen kleuren kunnen onderscheiden is de gevoeligheid wel afhankelijk van de golflengte. Zo zijn ze het meest gevoelig voor groen licht met een golflengte van 507 nm en het minst gevoelig voor het rode en blauwe deel van het lichtspectrum. De staafjes zijn gelijkmatig verdeeld over het netvlies.



Figuur 18 Spectrale ooggevoeligheid van de kegeltjes en de staafjes

2. De kegeltjes bevinden zich voornamelijk in de fovea, ook wel de gele vlek genoemd, van het netvlies. Ze vangen het licht op van dat deel van het

blikveld waar het oog op scherpgesteld is. De kegeltjes zijn actief bij grotere hoeveelheden licht en kunnen kleuren onderscheiden. We kennen drie typen kegeltjes: kegeltjes met pigmenten die gevoelig zijn voor blauw, voor rood en voor groen. De kegeltjes zijn het meest gevoelig voor geelgroen licht met een golflengte van 555 nm. Kortom dit licht heeft het minste vermogen nodig om een bepaalde helderheidsindruk te geven.

In paragraaf 1.2.1. is gezegd dat de lichtstroom afhankelijk is van de *spectrale ooggevoeligheid*. Rekening houdende met deze spectrale ooggevoeligheid is de lichtstroom in formulevorm als volgt:

$$\Phi \approx 670 \int_{380nm}^{780nm} V(\lambda) \frac{dP(\lambda)}{d\lambda} d\lambda$$

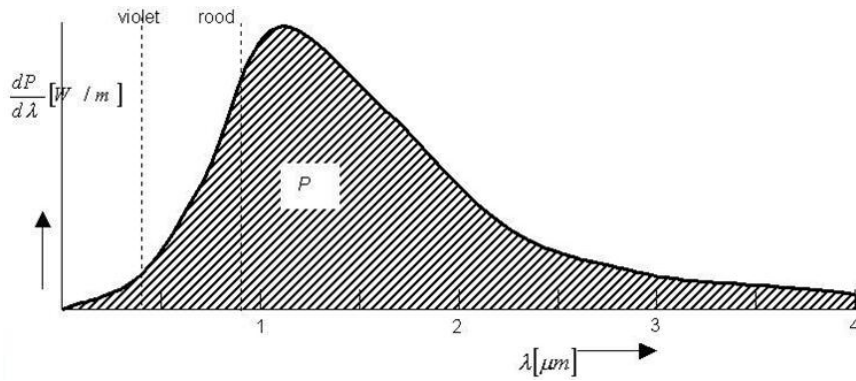
Zie figuur 21 voor de grafische weergave van de **spectrale ooggevoeligheid** (= gevoeligheid van het oog voor licht van verschillende golflengtes). Wiskundig wordt dit beschreven met de functie $V(\lambda)$

Waarin:

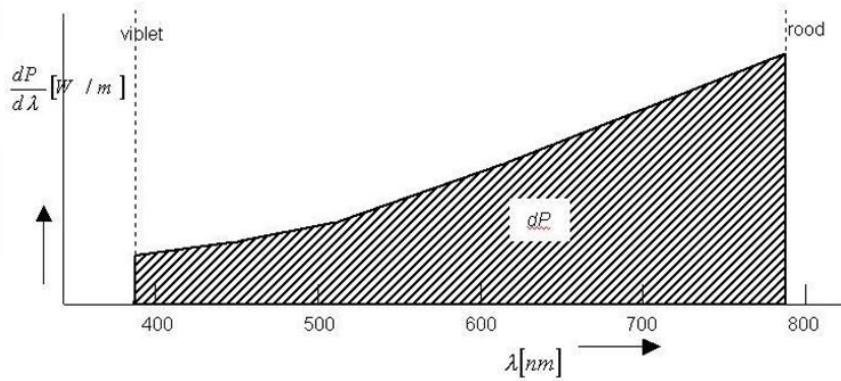
- Φ = lichtstroom [lm]
- 670 = fotometrisch stralingsequivalent [lm/W]
- $V(\lambda)$ = relatieve spectrale ooggevoeligheid [-]
- $\int_0^{\infty} \frac{dP}{d\lambda} d\lambda$ = spectrale vermogen [W]

Toelichting:

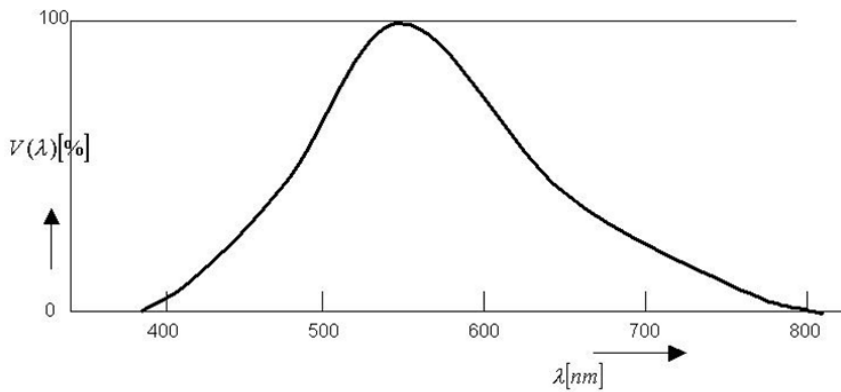
- Ons oog is het gevoeligst voor licht met een golflengte van 555 nm (de top van de grafiek).
- Voor licht van andere golflengten hebben we meer vermogen nodig om dezelfde helderheidsindruk te krijgen, het meest voor blauw en rood licht.
- De ooggevoeligheid wordt uitgedrukt in de verhouding tussen het vermogen dat nodig is voor een bepaalde helderheidsindruk bij gebruik van licht met een golflengte van 555 nm en het vermogen dat nodig is voor dezelfde helderheidsindruk bij gebruik van licht met een andere golflengte.
- Het vermogen bij 555 nm staat in de teller en het vermogen bij de andere golflengte staat in de noemer. De spectrale ooggevoeligheid kan dus maximaal 1 zijn (namelijk die voor licht met een golflengte van 555 nm).
- We spreken daarom van **relatieve** spectrale ooggevoeligheid omdat de waarde absoluut gezien geen betekenis heeft maar slechts in relatie met de waarde die geldt voor licht met een golflengte van 555 nm.
- In de formule is $V(\lambda)$ dus een correctie op het spectrale vermogen voor de ooggevoeligheid.
- Het getal 670 is niet dimensieloos. Wanneer een bron alle toegevoerde energie P in licht met een golflengte van 555 nm omzet, dan is blijkbaar de lichtstroom $\Phi = 670 \times P$ lm. Immers $V(\lambda)$ is 1. Per watt is 670 lm dus de hoogst mogelijke lichtopbrengst. Dit getal noemen we ook wel het fotometrische stralingsequivalent.



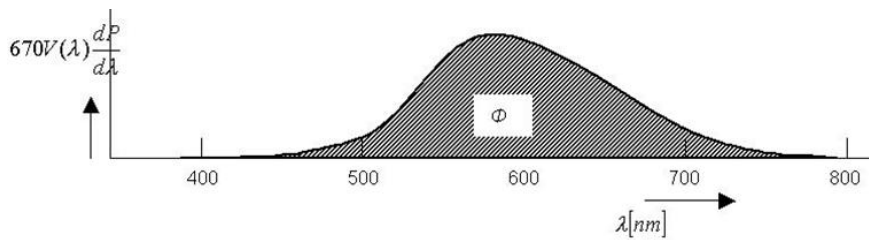
Figuur 19 Spectraal vermogen van een gloeilamp



Figuur 20 Spectraal vermogen van de zelfde gloeilamp in het zichtbare gebied



Figuur 21 Spectrale ooggevoeligheid



Figuur 22 Lichtspectrum van dezelfde gloeilamp

Als voorbeeld, om de relatie tussen lichtstroom en spectrale ooggevoeligheid te verduidelijken, nemen we een brandende gloeilamp (zie figuur 19). Deze zendt energie uit; hij geeft vermogen af. Dat vermogen is verspreid over een breed golflengtegebied. Het licht, het zichtbare gebied, vormt daarvan maar een klein gedeelte (uitvergroot in figuur 20). De grootste hoeveelheid energie wordt uitgestraald in het infrarode gebied ($> 780 \text{ nm}$). Als we het vermogen uitzetten tegen de golflengte ontstaat een kromme, het vermogensspectrum.

Slechts een klein oppervlakje van die kromme ligt in het zichtbare gebied van het spectrum (fig. 20). Wanneer we het vermogen per golflengte vermenigvuldigen met de bij die golflengte behorende spectrale ooggevoeligheid (fig. 21), ontstaat er het gewogen spectrum (fig. 22). We hebben van een energiestroom, geschreven in watt (wat op zich niets zegt over de hoeveelheid licht in de energiestroom), een lichtstroom gemaakt, geschreven in lumen.

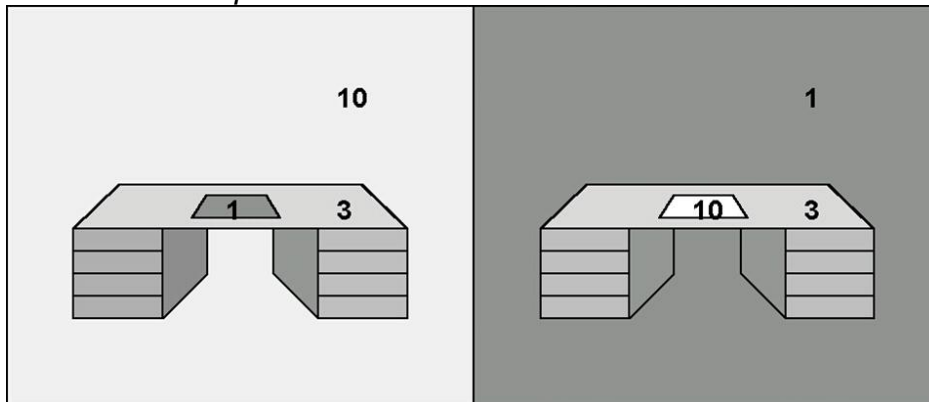
Zoals gezegd zijn de staafjes met name actief bij lage luminanties en de kegeltjes bij hogere. Dit verklaart ook hoe het komt dat we een landschap dat verlicht wordt door de volle maan, slechts in grijstinten zien. Er is zeer weinig licht aanwezig (luminantie is laag) waardoor wel de staafjes maar niet de kegeltjes geactiveerd worden. Dit verschijnsel noemen we **scotopisch** zien. De luminantie van een vlak is in dat geval lager dan $0,035 \text{ cd/m}^2$ is. Hoewel we bij scotopisch zien geen kleuren kunnen waarnemen krijgen we toch een indruk van de omgeving, zoals vormen, contouren en helderheidsverschillen. Ook zijn we in staat om bewegingen te signaleren.

Wanneer de luminantie hoger wordt dan $3,5 \text{ cd/m}^2$, worden ook de kegeltjes actief. Dit noemen we **fotopisch** zien. Nu kunnen we ook de kleuren, de afwerking en de details van het verlichte vlak in de ruimte zien. Omdat de kegeltjes zich concentreren in de fovea, betekent dit dat we details en kleuren waarnemen van het blikveld waar onze ogen zich op scherpgesteld hebben, terwijl we vanuit onze ooghoeken vooral (kleurloze) bewegingen kunnen waarnemen.

Tussen het scotopisch en het fotopisch zien ligt het **mesopisch** zien. Hierbij zijn de staafjes in z'n geheel en de kegeltjes gedeeltelijk in functie.

2.2.2. Adaptatie

Het menselijk oog is in staat om over een zeer groot bereik helderheden waar te nemen. Maar daar is wel aanpassing van het oog voor nodig. Die aanpassing noemen we *adaptatie*.



Figuur 23 Luminantieverhoudingen in een ruimte overdag (links) en 's nachts (rechts)

Voor overgangen tussen kleine helderheidsverschillen (verhouding 1:10) duurt de aanpassing slechts een fractie van een seconde. Is de overgang groter, bijvoorbeeld wanneer we tijdens de zomervakantie vanuit een kathedraal het zonovergoten plein opstappen, dan kost het duidelijk wat meer tijd voordat we aan de nieuwe lichtsituatie gewend zijn (10-12 minuten voor volledige adaptatie). De overgang van een hele lichte omgeving naar een hele donkere omgeving kost nog meer tijd (voor volledige adaptatie moet men rekening houden met ongeveer 60 minuten).

Ook bij het creëren van verlichtingscondities in een werkomgeving moet rekening worden gehouden met de tijd nodig voor adaptatie. Zo geldt er de regel dat de luminantieverhouding binnen een werkruimte ongeveer 1:3:10 moet zijn.

Tabel 2.7. Richtlijnen voor de luminantieverhoudingen volgens NEN 3087.

Luminantieverhouding				
Soortwerk		Visuele taak	Directe omgeving	Periferie
Lezen en/of schrijven		Papier	Werkvlak bureau	Wanden, kasten, vloer, venster
Beeldschermwerk		Beeldscherm	Rand beeldscherm werktafel	Wanden, kasten, vloer, venster
Richtlijn	Taak licht	1	3	10
	Taak donker	10	3	1
Acceptabel	Taak licht	1	10	30
	Taak donker	30	10	1

Een ruimte zal een onrustiger indruk maken naarmate de aanwezige luminantieverhoudingen de verhouding 1 :10 meer te boven gaan. De luminanties van de oogtaak en die van de directe omgeving moeten bij voorkeur niet meer dan een factor 3 van elkaar verschillen. Bij de vuistregel 1:3:10 kunnen we onderscheid maken tussen een daglichtsituatie en een kunstlichtsituatie. Overdag zal de hoogste luminantie optreden in het raamvlak; de luminantie van het werkvlak mag dus 10 keer zo laag zijn als die van het raam, mits deze voldoende is voor de oogtaak. In een kunstlichtsituatie zal normaal gesproken de luminantie van het werkvlak het hoogste zijn. In dit geval mag de luminantie van de oogtaak 3 keer zo hoog zijn als die van de directe omgeving en zelfs 10 keer zo hoog als die van de periferie. Let erop dat de 1:3:10 vuistregel met name voor werksituaties gehanteerd wordt. Voor sfeerverlichting of de verlichting voor andere doeleinden is deze verhouding minder relevant. De visuele oogtaak speelt hierbij namelijk een minder belangrijke rol.



De ambient tv voorkomt grote luminantieverschillen tussen tv-beeld en de omgeving.



Door "tegenlicht" gaan details verloren. Dit is een voorbeeld van te grote luminantieverschillen tussen de voorgrond (mensen) en de achtergrond (het raam)

2.2.3. Contrasten

Om voorwerpen te kunnen onderscheiden is contrast nodig. We kennen twee vormen van contrast die meestal tegelijkertijd optreden. Dit zijn het luminantiecontrast en het kleurcontrast.

Luminantiecontrast is de verhouding van de luminantie van een waar te nemen detail en die van zijn achtergrond in de visuele taak. De grootte van het contrast kan als volgt berekend worden.

$$C = \frac{(L_o - L_b)}{L_b}$$

Waarin:

- C = contrast [-]
- L_o = luminantie van het object [cd/m²]
- L_b = luminantie van de achtergrond [cd/m²]

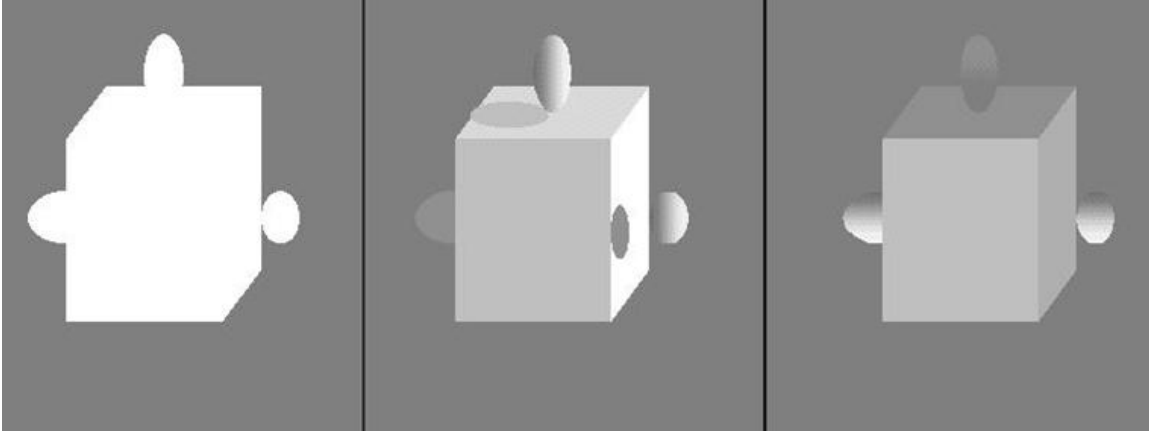
Een formule die ook regelmatig gebruikt wordt, is:

$$C = \frac{L_{max}}{L_{min}}$$

Waarin:

- C = contrast [-]
- L_{max} = grootste luminantie [cd/m²]
- L_{min} = kleinste luminantie [cd/m²]

De mogelijkheid van het oog om contrast waar te nemen hangt vooral af van de adaptatietoestand van het oog. Over het algemeen neemt de mogelijkheid om contrasten waar te nemen sterk toe bij toenemende luminantiewaarden. Beginnend bij zeer lage luminanties treedt bij een achtergrondluminantie van ca. 100 cd/m² een min of meer stationaire toestand in voor het waarnemen van contrasten. Pas bij zeer hoge luminanties (> 1000 cd/m²) neemt de gevoeligheid voor het waarnemen van luminantieniveaus weer af. Andere aspecten die een rol spelen bij het waarnemen van contrasten zijn de grootte van het contrasterend object en de observatietijd. Bij een adaptatieniveau waarbij het goed mogelijk is om contrasten waar te nemen neemt de contrastwaarneming af als de observatietijd korter is dan een halve seconde. Schaduw en contrast ontstaan door plotselinge veranderingen van helderheid en kleur.



Figuur 24 Hoewel de beide rechter afbeeldingen tweedimensionaal zijn, worden ze als driedimensionaal waargenomen

In het linker vlak van is een object afgebeeld zonder contrast en schaduw. In de beide afbeeldingen daarnaast is er wel sprake van contrast en schaduw. Ondanks dat deze beide ook tweedimensionale afbeeldingen zijn worden ze direct driedimensionaal geïnterpreteerd. Hierbij lijkt het of in de middelste afbeelding het licht van rechts komt en in de rechter afbeelding het licht van onderen komt.

Kleurcontrast.

Over het algemeen nemen we aan dat *kleurcontrast* minder bijdraagt tot de visuele informatie dan helderheidscontrast. Toch kan het menselijk oog, onder goede omstandigheden en goed getraind, zeer kleine verschillen in kleur waarnemen. Er moet echter aan een aantal voorwaarden voldaan worden. Allereerst moet het algemeen luminantieniveau voldoende zijn om het zien van kleuren mogelijk te maken (volledige adaptatie voor de kegeltjes op het netvlies) zonder dat er zeer hoge contrastverschillen in het gezichtsveld aanwezig zijn. Ten tweede dient de verlichting te geschieden met een lichtbron die een continu spectrum heeft en een kleurtemperatuur (deze term wordt uitgelegd in paragraaf 3.4.1.) waarvan de spectrale energieverdeling niet te veel afwijkt van de spectrale gevoeligheid van het oog voor het fotonisch zien.

Als de lichtbron geen continu spectrum heeft maar een bandspectrum (3.4.2.), dan neemt de mogelijkheid voor het oog om kleurverschillen waar te nemen sterk af. Onder bepaalde omstandigheden kunnen twee kleurtinten die er onder een lichtbron identiek uitzien, onder het licht van een andere lichtbron duidelijk verschillend zijn. Dit fenomeen wordt metamerisme genoemd.

2.2.4. Verblinding

Verblinding kunnen we omschrijven als de gezichtstoestand die als onbehaaglijk wordt ervaren of waarbij er een vermindering is van het vermogen om details of voorwerpen te zien als gevolg van te hoge luminanties in het gezichtsveld of door te grote luminantiecontrasten.



Figuur 25 Directe verblinding door de zon en indirect door reflectie in het water

We maken onderscheid tussen:

- Directe verblinding; als gevolg van de aanwezigheid van te heldere lichtbronnen of vensters in het gezichtsveld of in de buurt van de kijkrichting,
- Verblinding door reflectie; veroorzaakt door reflectie van lichtbronnen in spiegelend reflecterende vlakken. Met name indien de spiegelbeelden zich voordoen op of dichtbij oogtaken.

Wat de gevolgen van de verblinding betreft maken we onderscheid tussen:

- Storende verblinding; waarbij er sprake is van zulke grote luminantie(-contrasten) dat de visuele waarneming en de contrastgevoeligheid van het oog meetbaar ongunstig worden beïnvloed, zonder noodzakelijkerwijs onbehagen te veroorzaken.
- Onbehaaglijke verblinding; waarbij een subjectief gevoel van hinder en onbehagen ontstaat zonder de waarneming van voorwerpen nadelig te beïnvloeden.

2.2.5. Oogbewegingen

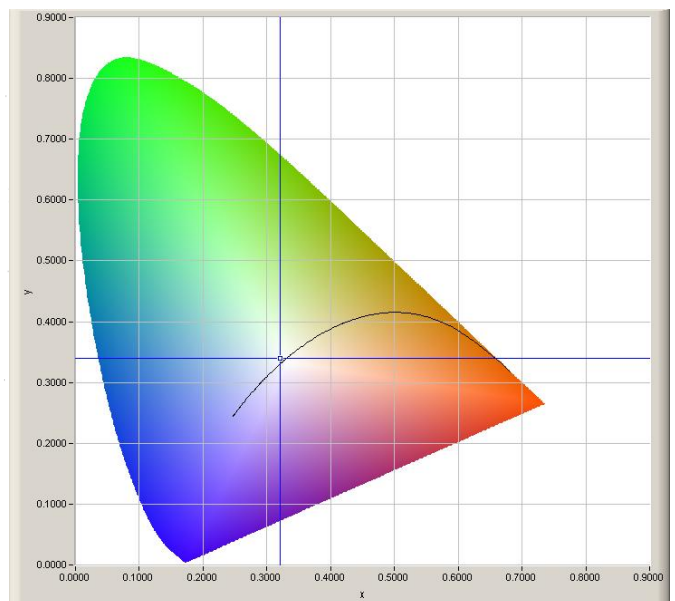
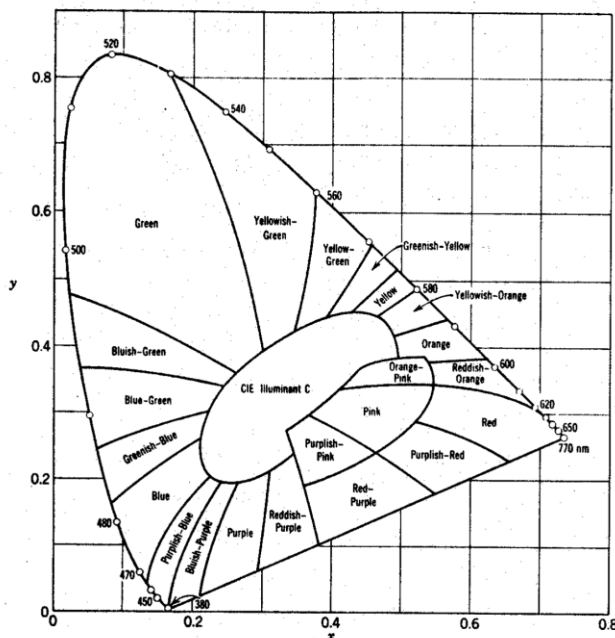
Om een beeld op te bouwen zijn de bewegingen van het oog belangrijk. Als het oog niet beweegt, verdwijnt het beeld uit de hersenen. Als we lange tijd naar een zelfde object kijken (staren), zullen we daardoor dit object niet meer waarnemen. Om te blijven waarnemen, tast het oog voortdurend de omgeving af. Uit de verschillen in helderheden wordt zo het beeld opgebouwd. Voor het verlichten is het dus van belang om die helderheidsverschillen te creëren. Gebeurt dit niet, dan ervaren we een ruimte al snel als saai en oninteressant. Ook randen en kaders in de architectuur en de kunst worden als belangrijk beschouwd. Dit heeft er mee te maken dat onze ogen allereerst de randen aftasten voordat het oppervlak binnen de randen gescand wordt.

2.2.6. Kleur

Kleuren vormen een essentieel onderdeel in de communicatie en geven ook aanvullende informatie over de toestand van de dingen. De gelaatskleur van mensen zegt veel over hun emotionele of fysiologische gesteldheid. Kleuren kunnen gekoppeld worden aan beelden en roepen associaties op. Groen kan worden geassocieerd met milieu en natuur, blauw met hemel, water en adellijk en rood met warmte, vuur en gevaar. Kleuren hebben hierdoor een sterke signaalwerking. Voorwaarde is wel dat de kleur contrasteert met zijn achtergrond.

Licht is veelal samengesteld uit een groot aantal kleuren. Het spectrum van het zichtbare licht kan worden gescheiden in de samenstellende kleuren en verloopt van violet via blauw, groen, geel, oranje naar rood. Het normale oog is gevoelig voor al deze kleuren.

Er zijn verschillende systemen om kleuren te kunnen beschrijven. Meestal wordt gebruik gemaakt van het CIE systeem (CIE staat voor Commission Internationale de l'Eclairage. Dit is een commissie die internationaal afspraken maakt over verlichting) om de kleur van lichtbronnen te karakteriseren. Het gebruikt coördinaten in de kleurendriehoek waarbij de x en y coördinaten het kleurpunt definiëren. Door de z-coördinaat te definiëren als de reflectie factor van een vlak, kunnen we hiermee de kleur van dat vlak definiëren. B.v. $x = 0,545$, $y = 0,398$ en $\rho = 28,8$ vertegenwoordigt een oranje tint.



Figuur 26 CIE kleurenkaart

In de verlichting spreken we over additieve kleurmengingen. Rood, blauw en groen licht geven tezamen wit licht; ook kan door de combinatie van deze drie kleuren elke andere lichtkleur samengesteld worden. Hierop berust het principe van de kleurentelevisie. Bij het mengen van kleuren (b.v. verf) spreken van subtractieve kleurmengingen. Hierbij behoren magenta, cyaan en geel tot de primaire kleuren. Een belangrijk verschil tussen additieve en subtractieve kleurmenging is dat het resultaat bij additieve kleurmenging altijd helderder is dan de te mengen kleuren terwijl bij subtractieve kleurmenging het resultaat juist donkerder is.

Als een object een bepaalde kleur heeft wil dat zeggen dat het object alle kleuren absorbeert en alleen de desbetreffende kleur reflecteert. Bij een groen object worden dus de rood- en violettinten van het licht geabsorbeerd en vooral de groentinten en in mindere mate de blauw- en geeltinten gereflecteerd. Daglicht heeft een continu spectrum, wat wil zeggen dat alle kleuren door daglicht zichtbaar gemaakt worden. Voor kunstlicht is dit afhankelijk van de toegepaste lichtbron; niet alle lampen geven licht met een continue spectrum (zie 3.4.1.).

2.2.7. Gezichtsscherpte

Voor het scherp kunnen zien zijn een goede focus van het beeld op het netvlies en voldoende licht noodzakelijk. In hoeverre mensen scherp zien kan worden gemeten, bijvoorbeeld met de Snellenkaart. Deze kennen we allemaal van de oogarts.

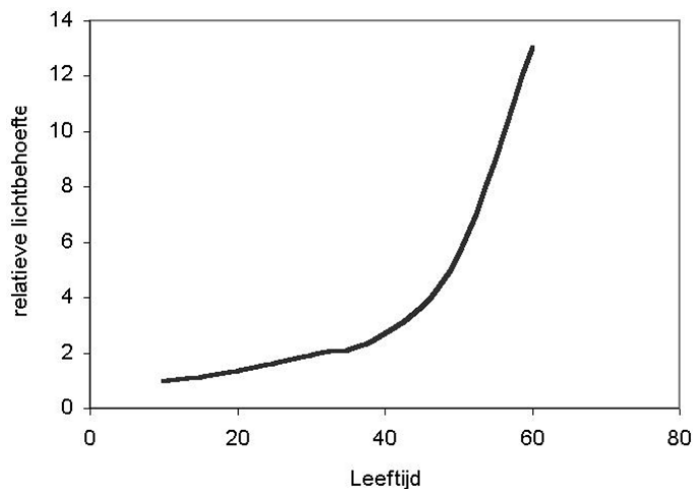


Figuur 27 Snellenkaart

Enkele factoren beïnvloeden de gezichtsscherpte. Zoals eerder gezegd, zien mensen alleen scherp op de gele vlek (fovea). Aan de randen van ons gezichtsveld zien we steeds vager. Om alles scherp te kunnen zien moeten de ogen bewegen. Om voorwerpen op verschillende afstanden scherp te kunnen zien kan de brandpuntsafstand van de ooglenzen met behulp van de ciliaire spieren aangepast worden (accommodatie). Voor scherpe projectie van voorwerpen op korte afstand is een lens met kortere brandpuntsafstand nodig dan voor voorwerpen op grote afstand. Bij afwijkingen van de vorm van het oog

kan echter ver of bijziendheid optreden. Mensen die bijziend zijn zien alleen voorwerpen op korte afstand scherp. Een verziend iemand ziet alleen voorwerpen op grotere afstand scherp.

Naast het accommoderende vermogen van het oog, is ook de **verlichtingssterkte** van invloed op de **gezichtsscherpte**. Met de kegeltjes kunnen mensen beter scherp zien dan met de staafjes. Echter, de kegeltjes hebben meer licht nodig. Vandaar dat de gezichtsscherpte toeneemt naarmate de helderheid van de waargenomen objecten toeneemt. Bij 3000 cd/m² is de maximale waarde bereikt. Naarmate we ouder worden neemt de ooggevoeligheid (met name van de kegeltjes) af. Dit betekent dat oudere mensen voor het verrichten van een bepaalde visuele oogtaak, bijvoorbeeld lezen, veel meer licht nodig hebben dan jongeren.



Figuur 28 Relatieve lichtbehoefte voor een oogtaak naar leeftijd

Uit de figuur kunnen we aflezen dat een 60-jarig persoon, 15 keer zoveel licht nodig heeft als een 10-jarige.

Een belangrijke factor die de gezichtscherpte nadelig beïnvloedt is verblinding (zie paragraaf 2.2.4.). Een fel tegenlicht, spiegeling van licht in een glossy tijdschrift, is letterlijk verblindend omdat kegeltjes minder gevoelig worden door adaptatie aan het felle licht. Het oog past zich automatisch aan aan de grootste helderheid.

3. Ontwerpen met licht

In de vorige paragrafen hebben we een idee gekregen van wat licht is, met welke grootheden we te maken hebben en hoe wij de omgeving door licht kunnen waarnemen. In deze paragraaf behandelen we de mogelijkheden om het licht in een ruimte zo te beïnvloeden dat we een vooropgezet effect bereiken.

Bij het ontwerpen met licht maken we onderscheid tussen de dagsituatie en de nachtsituatie. Voor de dagsituatie zijn het ramen waarmee we licht in gebouwen brengen en voor de nachtsituatie zijn het lampen, meestal gevat in een armaturen. Door de ramen valt zowel daglicht als zonlicht binnen. Zoals we eerder hebben gezien bedoelen we met daglicht niet direct zonlicht maar zonlicht dat tot ons komt via de hemelkoepel. Een lichtontwerp voor de dagsituatie baseren we in ons land op daglicht, niet op zonlicht; we kennen immers veel bewolkte dagen.

Voor de nacht- (en avond)situatie maken we gebruik van kunstlicht. Dag- en nachtsituatie vereisen dus in principe heel verschillende ontwerpen. Toch is het ook nodig naar de afstemming tussen dag- en kunstverlichting te kijken: kunstlicht is vaak nodig als aanvulling op daglicht, zowel overdag op donkere dagen als wanneer de avond valt.

Er staan ons dus 2 soorten middelen ter beschikking:

1. Bouwkundige middelen. De bouwkundige 'lichtbron' is het raam. Met keuzen t.a.v. de positie en grootte van het raam (de ramen) beïnvloeden we de hoeveelheid en verdeling van het daglicht in de ruimte. Met speciaal daarvoor aangebrachte vlakken kunnen we de richting van het licht beïnvloeden. Verder is ook de reflectiefactor en de afwerking van scheidingsconstructies van invloed op de verlichtingssterkte of luminantie.
2. Installatietechnische middelen. De installatietechnische lichtbron is de lamp. Met keuzen t.a.v. de soort lamp, het vermogen en de positie, gecombineerd met het zijn armatuur, beïnvloeden we de kleur van het licht, de hoeveelheid en de verdeling van het kunstlicht in de ruimte.



Figuur 29 Links dagsituatie rechts nachtsituatie

3.1. Bouwkundige middelen

Als we weten waar het gedrag van daglicht in de ruimte mee samenhangt, kunnen we hier natuurlijk tijdens het bouwkundige ontwerpen rekening mee houden en invloed op uit oefenen. Helaas gebeurt dit nog niet altijd. Het raam wordt door de ontwerper in veel gevallen beschouwd als een vlak dat vanuit esthetisch oogpunt moet passen in de gevel. In dit dictaat ligt de nadruk op de invloed van ramen op het binnenklimaat.

In de volgende paragrafen wordt nader uitgelegd welke bouwkundige elementen invloed hebben op het gedrag van daglicht in een ruimte en hoe we de hoeveelheid daglicht in een ruimte ook daadwerkelijk kunnen berekenen en voorspellen.

We hebben een overzicht gemaakt van de belangrijkste bouwkundige middelen die we tot onze beschikking hebben. Per onderdeel zullen we bekijken wat hiervan de invloed is op het licht in een ruimte.

Eerst behandelen we het raam en de eigenschappen die van invloed zijn op de hoeveelheid daglicht die binnenkomt. Vervolgens gaan we in op de middelen die invloed hebben op de lichtverdeling. Dan kijken we naar het vertrek met zijn afmetingen, scheidingsconstructies en inrichting. Tenslotte besteden we nog aandacht aan de invloed van lichtobstructies.

- 3.2.1. Raamgrootte
- 3.2.2. Oriëntatie raam
- 3.2.3. Soort glas
- 3.2.4. Positie en vorm van ramen
- 3.2.5. Raamafscherming
- 3.2.6. Luifels
- 3.2.7. Reflecties en obstructies buiten
- 3.2.8. Afmetingen van de ruimte
- 3.2.9. Kleurgebruik en afwerking van de ruimte

3.2. Het raam

Elke constructie in een scheidingsconstructie die licht doorlaat noemen we hier raam. Veruit de meeste ramen laten niet alleen licht door maar maken ook uitzicht mogelijk. We spreken van transparante ramen. Constructies die licht doorlaten maar uitzicht niet mogelijk maken noemen we translucet. Hieronder bespreken we een aantal raameigenschappen die van invloed zijn op het licht in een ruimte.

3.2.1. Raamgrootte

Vooropgesteld zij dat ruimten waarin mensen verblijven in beginsel voorzien moeten zijn van ramen. Dat ligt voor woningen vast in het bouwbesluit. Ook voor ruimten waarin gemiddeld per dag meer dan 2 uur arbeid wordt verricht geldt dat er openingen moeten zijn aangebracht waardoor daglicht naar binnen kan komen. De gezamenlijke oppervlakte van deze lichtopeningen dient tenminste 5% van de vloeroppervlakte van de ruimte te bedragen. Dit ligt vast in het Arbeidsomstandighedenbesluit (gerelateerd aan de Arbo-wet).

Ook voor woningbouw ligt er een ondergrens vast als percentage van de vloeroppervlakte. Die bedraagt voor verblijfsgebieden 10%. Het betreft dan een situatie zonder obstructies. Let er wel op dat dit minimumwaarden zijn en zeker geen ideale waarden. Liever gaan we uit van raamoppervlakten die eerder 20% van de vloeroppervlakte bedragen. Overigens dient elk geval apart te worden bekeken en is 20% slechts een globale indicatie.

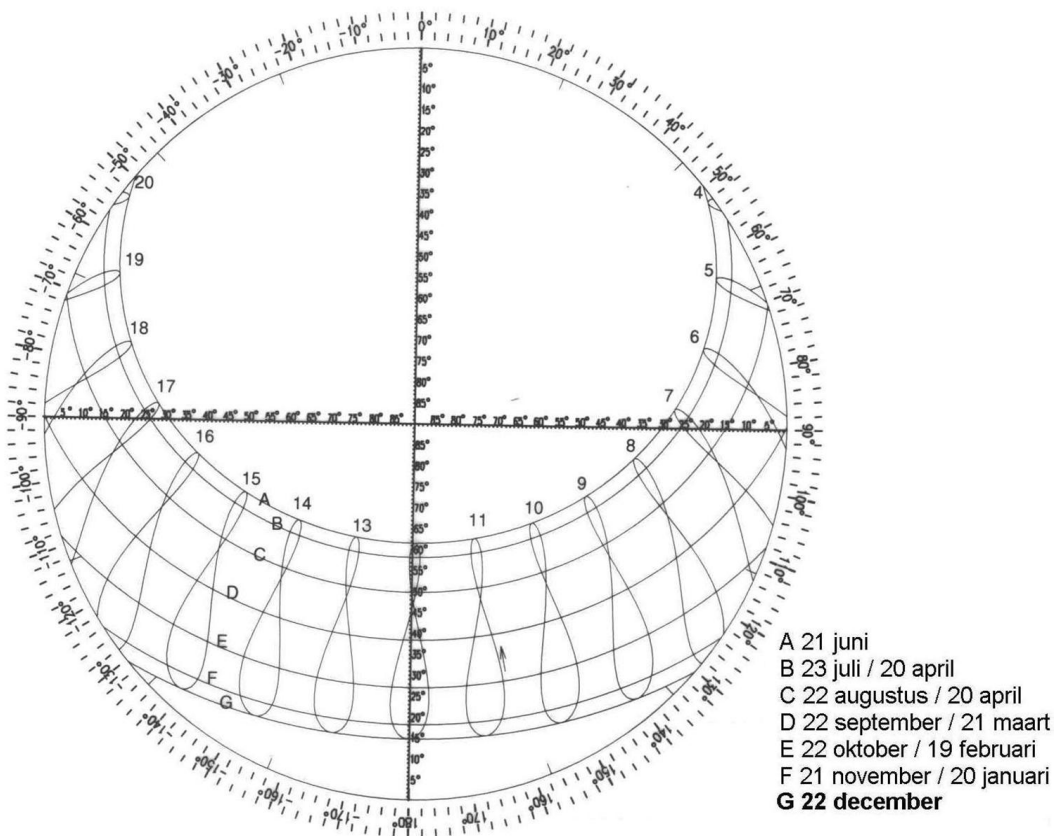
Het mag duidelijk zijn dat de hoeveelheid daglicht die per m² raamoppervlakte naar binnen valt sterk wisselt. Van welke lichtsituatie buiten gaan we uit om de raamoppervlakte van een vertrek te bepalen? Hiervoor is de standaard CIE hemel ontwikkeld. Deze standaard is algemeen geaccepteerd. Er wordt uitgegaan van een volledig bewolkte hemel met een luminantie die in het zenit het grootst is en verloopt naar de horizon waar de luminantie 1/3 is van die in het zenit.

In Nederland geldt, zoals gezegd, een voorgeschreven minimum raamoppervlakte van 10% van de vloeroppervlakte van het vertrek. Er wordt daarmee een verband gelegd tussen vloeroppervlakte en raamgrootte. Op zich niet zo onlogisch, immers hoe groter het vertrek, des te meer licht zal er nodig zijn om een zelfde verlichtingssterkte te verkrijgen. Maar het is een wel erg grove eis; er wordt geen rekening gehouden met vorm en positie van het raam en ook niet met de vorm van de ruimte. Toch kan deze ondergrens ons op weg helpen. De juiste raamgrootte (in combinatie met vorm en positie) bepalen we in afwegingen betreffende de gewenste hoeveelheid en verdeling van het daglicht in de ruimte (zie verder).

3.2.2. Oriëntatie raam

Voor daglicht maakt de verticale geveleoriëntatie niets uit. We gaan in ons geval immers uit van een volledig bewolkte hemel. Des te meer heeft de hoek die het raam met de aarde maakt invloed op de hoeveelheid daglicht die erop valt (en dus binnenvalt). Op een raam in een horizontaal vlak (een daklicht dus in een plat dak) valt al gauw 3x zoveel licht als op een raam in een gevel. Dat komt omdat de luminantie van de hemel (althans in de standaardhemel), zoals we eerder hebben gezien, naar het zenit toe een hogere waarde heeft. Dus ook ramen in het vlak van een hellend dak laten, afhankelijk van de hellingshoek, meer licht door dan ramen in een gevel.

Voor zonlicht maakt de oriëntatie van het raam natuurlijk wel veel uit. De zon heeft naast een dagelijks, ook een seizoensgebonden patroon. Zoals we weten komt de zon op in het oosten en gaat zij onder in het westen. In het zuiden bereikt ze haar hoogste punt. De maximale hoogte van de zon hangt af van de breedtegraad waarop wij ons bevinden op aarde. Uit het zonbaandiagram voor ons land valt af te lezen dat de maximale zonshoogte op 21 juli zo'n 62° is terwijl op 22 december de zon niet boven de 15° uitkomt.



Figuur 30 Zonnebaandiagram bij 52° noordenbreedte

Op de evenaar is de gemiddelde hoek die de zon met de aarde maakt veel groter dan op de polen. Hierdoor is de hoeveelheid licht (verlichtingssterkte!, zie paragraaf 1.3.4. en in het algemeen de hoeveelheid energie) per oppervlakte-eenheid een stuk groter.

Door ramen op het noorden (geldt voor het noordelijk halfrond!) valt licht met een koelere kleur binnen dan door ramen op het zuiden. Dit komt omdat het licht uit het noorden over het algemeen alleen uit hemellicht bestaat en dus geen direct licht van de zon geeft. Het licht van de zon is warmer van kleur dan het licht dat verstrooid wordt door de hemelkoepel.

Bij het ontwerpen van bijvoorbeeld een woning kun je, door rekening te houden met de geveloriëntatie en dus de zon, een meerwaarde aan je ruimtes geven. Een raam op het oosten kan 's ochtends direct zonlicht in een ruimte geven. Door tijdens het ontbijt wat extra licht en warmte in bijvoorbeeld de keuken te hebben, kan dit het opstaan veraangenamen. Hetzelfde geldt voor slaapkamers. Ook hier is het vaak prettig om de ramen meer in oostelijke richting te oriënteren. Zou je de ramen op het zuiden of westen hebben geplaatst, dan heb je ten eerste minder profijt van de ochtendzon en ten tweede wordt de slaapkamer met name in de zomer, erg warm.

3.2.3. Soort glas

Elk type glas zal het daglicht in meer of mindere mate beïnvloeden. Het heeft, omdat het een lichtdoorlatend materiaal is, een doorlatingsfactor, een reflectiefactor en een absorptiefactor. Helder, enkel glas zal het daglicht dat naar binnen komt het minst beïnvloeden. Indien er bij de productie van het glas een kleuring toegevoegd wordt, zullen de verhoudingen tussen de 3 factoren veranderen.

De keuze voor een glasoort kan bepaald worden aan de hand van de lichttechnische kwaliteit, de thermische kwaliteit en/of de geluidsabsorberende kwaliteit ervan. Om naar buiten te kunnen kijken geven we er de voorkeur aan om het glas zo 'helder' mogelijk te maken om een natuurgetrouwe indruk van buiten te krijgen. Om de zonnewarmte buiten een ruimte te houden kan de beglazing van een coating worden voorzien. Deze coating reflecteert niet alleen een groot deel van het zonlicht maar heeft ook invloed op het spectrum van het naar binnenkomende licht. Dat laatste geldt ook voor zonerend glas dat zonnestraling vooral absorbeert.

De transmissie van het licht door glas wordt uitgedrukt in de LTA-waarde (Lichttransmissie: Verhouding tussen de hoeveelheid doorgelaten licht en de hoeveelheid opvallend licht). Voor enkel glas geldt een LTA-waarde van ongeveer 0,78. In het geval van b.v. lichtreflecterend glas, kan de LTA waardes aannemen van nog maar 0,10.



Figuur 31 Regelbare beglazing: bruikbaar als helderheidswering. De LTA links is 60% en rechts 18%

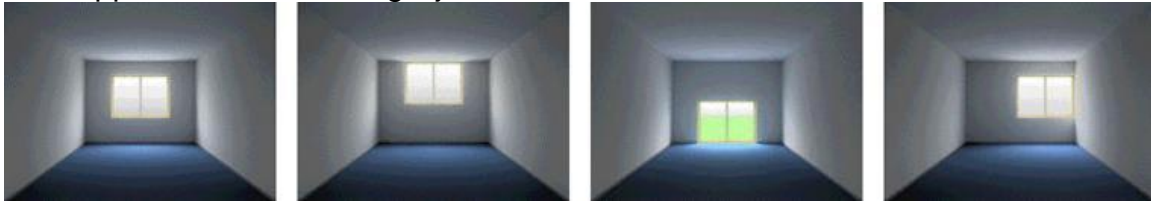
De keuze voor het type glas wordt in belangrijke mate bepaald vanuit thermische (en met name energetische) overwegingen en niet zozeer vanuit het aspect van lichttechnische comfort voor de gebruiker. Als we dat wel zouden doen, werd getint glas in gebouwen veel minder vaak toegepast en werd in plaats daarvan naar betere en effectievere oplossingen gezocht om het dag- en zonlicht te sturen.

Momenteel wordt er op het TU/e terrein een internationaal onderzoek uitgevoerd (SWIFT-Project) naar de toepasbaarheid van regelbare beglazing als helderheidsvering (electrochrome glazen zie figuur).

3.2.4. Positie en vorm van ramen

De afmetingen van het raam bepaalt in belangrijke mate de hoeveelheid licht die in een ruimte komt. Maar de positie van het raam in de gevel, samen met de raamvorm, is bepalend voor de lichtverdeling en daarmee samenhangend, voor wat het licht met de ruimte doet.

Om daarin wat inzicht te krijgen beschouwen we enkele verschillen raamposities en raamvormen in een eenvoudige rechthoekige ruimte. De (totale) raamoppervlakte is steeds gelijk.



Figuur 32 Verschillende raamposities in de gevel, standaardraam.

Door de positie van het raam te veranderen, verandert ook de indruk van de ruimte en de lichtverdeling. Als het raam hoger in de gevel geplaatst wordt, zal ook meer licht terechtkomen op het plafond. De ruimte zal hierdoor hoger lijken. Tevens zal de verlichtingssterkte achterin het vertrek omhoog gaan. Plaatsen we het raam laag in de gevel, dan blijft het plafond relatief donker, waardoor de ruimte ook lager lijkt. Door het raam extra hoog of laag in de gevel te plaatsen, kan de mogelijkheid om naar buiten te kijken veranderen. In het vierde geval wordt het raam uit het midden van de gevel geplaatst, waardoor de symmetrie weg is; de aandacht zal meer uitgaan naar de rechter wand.

Bovenstaande effecten zullen ook optreden wanneer we de openingen over de hele breedte van een gevel maken.



Figuur 33 Lage, brede ramen

Door de andere vorm van de ramen, wordt het uitzicht ook duidelijk anders. Deze aspecten zijn natuurlijk minstens zo belangrijk in de keuze van de daglichtopening. Het eerste type raam zou een voorbeeld kunnen zijn van een kelder die zich gedeeltelijk onder de grond bevindt of van een ruimte waarbij het uitzicht ondergeschikt is aan de hoeveelheid daglicht die de ruimte binnenkomt. Door de ramen laag in de gevel te plaatsen is er op stahoogte vrijwel geen uitzicht; we zien alleen de bodem van het buitengebied. Indien we echter onze

kijkhoogte verlagen (bijvoorbeeld door te gaan zitten) dan zullen we wel naar buiten kunnen kijken. Hierdoor kunnen we, met de plaatsing van de ramen, het gedrag van mensen enigszins sturen.

De plaatsing van het raam in het middenvlak biedt licht en uitzicht.

Zogauw de opening over de complete hoogte, in verticale richting gemaakt wordt krijgen we een duidelijke tweedeling van de ruimte.



Figuur 34 Smalle, hoge ramen

Als we de oppervlakte van de openingen nu hetzelfde houden, maar smaller en verdelen over de gevel, lijkt het alsof we meer uitzicht hebben. Dit komt omdat we in onze hersenen het 'ontbrekende' stukje proberen op te vullen.

Als we nu de ramen helemaal aan de zijkant van de gevel plaatsen, wordt de connectie minder snel gemaakt. Dit komt omdat het middenstuk veel groter is dan de openingen, waardoor hier de nadruk op komt te liggen. Ook zien we duidelijk een verschil in ruimtebeleving tussen de rechter en de linker afbeelding. Bij de linker lijkt de ruimte smaller terwijl bij rechter de ruimte breder lijkt. (lichtere delen trekken de aandacht).

Door in meerdere gevelvlakken ramen te plaatsen krijgen we naast een andere ruimte indruk, ook een andere lichtverdeling; zowel de hoeveelheid als de richting van het licht wordt gestuurd. Doordat het licht van meerdere kanten komt komen drie dimensionale objecten beter tot hun recht (modelling!).

In de vorige voorbeelden werd met name gekeken naar de consequenties van ramen in een verticaal vlak. Een raam in het horizontale dakvlak geeft een totaal ander effect.

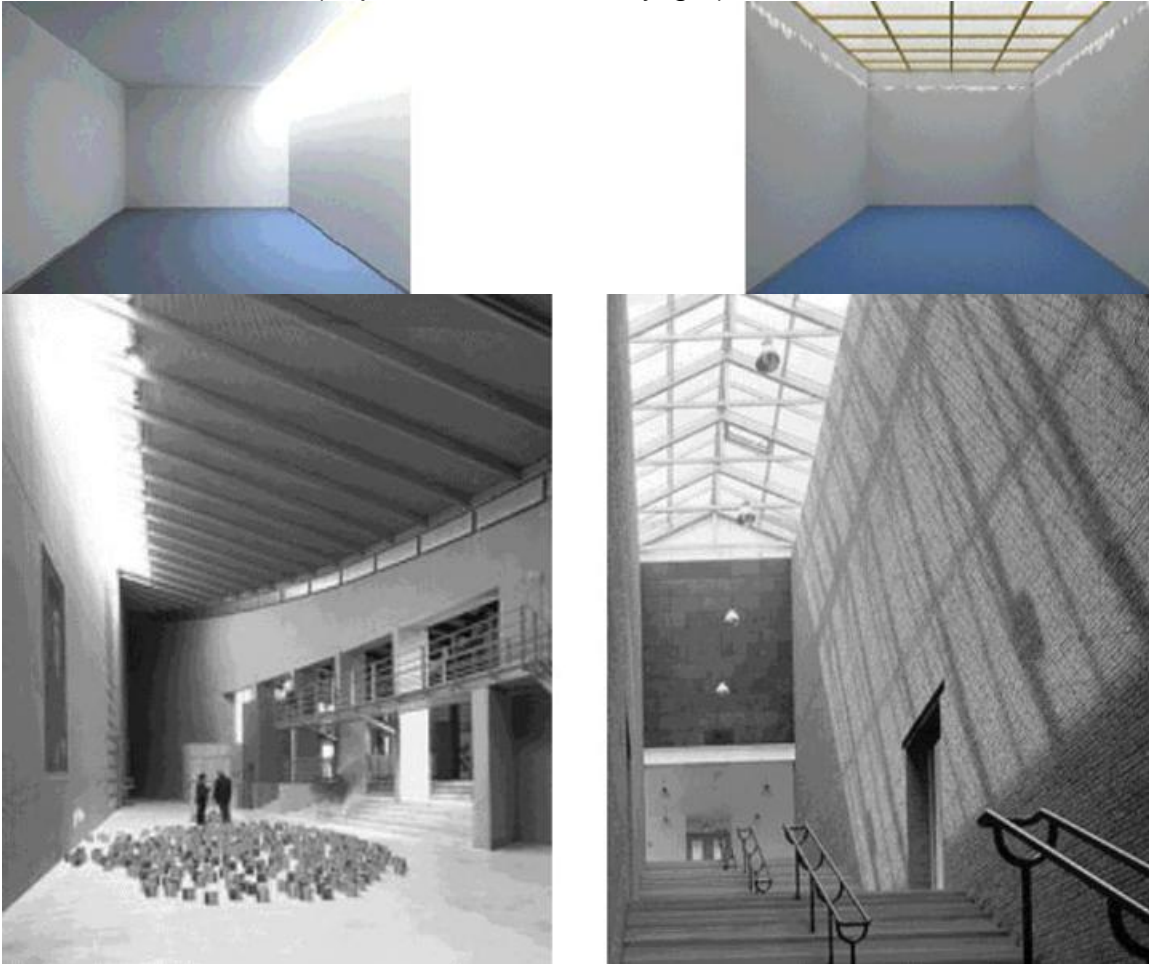


Figuur 35 Daklichten geven relatief veel licht, maar een beperkt uitzicht

Allereerst is het uitzicht natuurlijk beperkt. Als opening waar daglicht door naar binnen komt werkt het ook heel anders. Door een transparante horizontale daglichtopening zal veel meer licht de ruimte binnenkomen dan door een verticale opening. De oorzaak is dat bij een verticaal vlak maar maximaal de helft van de hemelkoepel zichtbaar is. Daarnaast is het zo dat de luminantie van de geheel bewolkte hemelkoepel recht boven ons een factor 3 hoger is dan de hemelkoepel aan de horizon. Tevens zal er in de praktijk vaak sprake zijn van

meer belemmering van het daglicht in het verticale vlak. Hierbij kun je denken aan bomen, maar ook bebouwing, schuurtjes, schuttingen etc. Afhankelijk van de positie en de grootte van de daglichtopening(en) zal de ruimte gelijkmatig, dan wel ongelijkmatig verlicht worden. Hieronder enkele andere afbeeldingen van een ruimte die verlicht wordt met behulp van daglicht vanuit het horizontale dakvlak.

Meer afbeeldingen met bijbehorende daglichtfactoren zijn te zien via deze link van BPS van de TUE (<http://sts.bwk.tue.nl/daylight>).



Figuur 36 De vorm van het daklicht heeft grote invloed op de ruimteperceptie

3.2.5. Raamafscherming

Bij het Nederlandse weertype vinden we de aanwezigheid van daglicht prettig. Te grote hoeveelheden zijn echter hinderlijk. Om hinder te voorkomen gebruiken we raamafschermingen.

Raamafschermingen kunnen om twee redenen gebruikt worden.

1. Zonwering. Vanwege de vaak grote hoeveelheid hindert direct zonlicht ons in onze werkzaamheden. In de paragraaf "Mens en licht" hebben we geconstateerd dat het oog zich instelt op de hoogste helderheid binnen het blikveld. Het zonlicht heeft zo'n hoge luminantie, zeker in verhouding tot een gemiddeld kantoorvertrek, dat werken onmogelijk kan worden. Een

manier om grote contrasten te verminderen is het plaatsen van screens of horizontale/verticale lamellen. Een andere reden om het directe zonlicht te weren is de warmte (dit onderwerp wordt behandeld in een andere bouwfysicacursus). Door de straling van de zon kan de temperatuur in en ruimte te veel oplopen. Ook daarom is het van belang om de zonnestraling te kunnen weren. Het beste kan dat gebeuren middels buitenzonweringen bijvoorbeeld in de vorm van doeken of lamellen.



Figuur 37 Door gebrek aan helderheidswering worden allen contouren zichtbaar

2. Helderheidswering. Als de zon niet schijnt is de helderheid van het raam vaak veel groter dan die van de ruimte zelf. In de paragraaf over contrasten is de vuistregel 1:3:10 beschreven. Om hieraan te voldoen maken we in veel gevallen gebruik van helderheidswering van het daglicht. Omdat we met helderheidswering ook altijd een deel van het bruikbare daglicht weren en het uitzicht belemmerd wordt, wordt bij voorkeur gebruik gemaakt van een regelbare helderheidswering.

3.2.6. Luifels

Er zijn verschillende redenen om luifels toe te passen. Allereerst worden ze toegepast uit functionele overwegingen. In kantoren worden ze aangebracht om een deel van het directe licht (en warmte) en het diffuse licht te weren. Voor een etalage in een winkelstraat gebruikt men nogal eens een luifel om het winkelende publiek de mogelijkheid te bieden om in de etalage te kunnen kijken. Door de spiegeling van de grote hoeveelheid licht op het glas van de etalage, wordt men vaak enigszins verblind, waardoor het zicht verminderd wordt. De extra sterke lampen in de etalage compenseren dit vaak slechts ten dele. Naast een functionele overweging, kunnen luifels ook geplaatst worden uit esthetische overwegingen. Door op gelijke afstanden luifels te plaatsten ontstaat er een interessant lijnenspel, dat versterkt wordt door de schaduwwerking die optreedt bij de aanwezigheid van direct zonlicht. Als de luifels beloopbaar gemaakt worden, kunnen ze eveneens gebruikt worden voor de ramenwasser. Luifels

hebben als nadeel dat ze permanent aanwezig zijn, dus ook als de zon niet schijnt en ze overbodig of zelfs ongewenst zijn.



Figuur 38 Luifels aan een gebouw zorgen met name voor zonwering

3.2.7. Reflecties en obstructies buiten

Bebouwing die vanuit een raam zichtbaar is beneemt altijd het zicht op een deel van de hemelkoepel en vangt dus daglicht weg. Ook bomen kunnen een obstructie vormen voor daglicht.

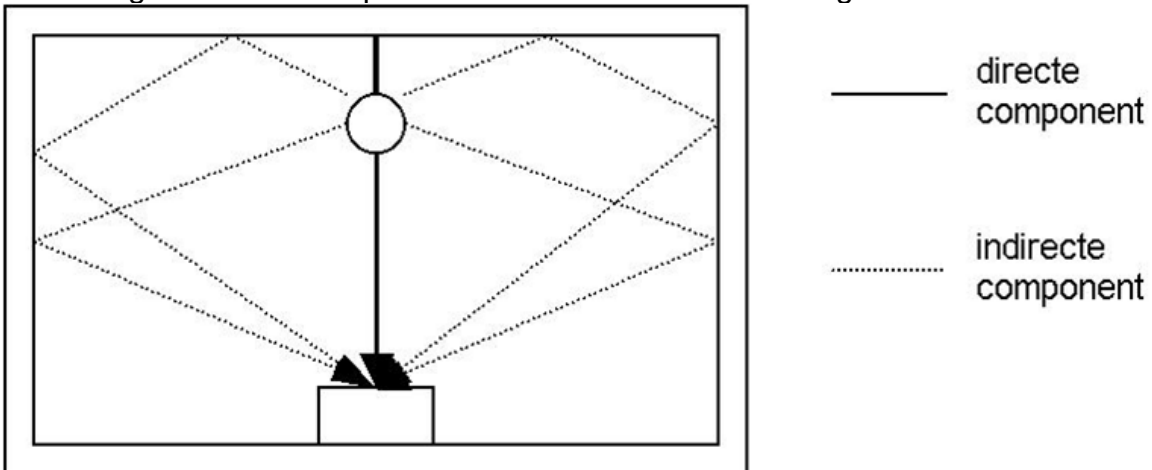
Omliggende bebouwing neemt niet alleen daglicht weg door obstructie van het licht vanuit de hemelkoepel maar kan door reflectie ook een positieve bijdrage leveren. Hoe groot die is hangt ondermeer af van de reflectiefactor van de gevels van die bebouwing. Zeker als we ook nog kijken naar de directe zonbestraling kan die bijdrage flink oplopen. Denk bijvoorbeeld aan een op het noorden georiënteerde gevel waar via een tegenoverliggende witte gevel extra licht naar binnenkomt. Als de tegenoverliggende gevel spiegelt (het zonlicht wordt niet diffuus weerkaatst) kan dat tot overlast leiden. Een voorbeeld hiervan is het hoofdkantoor van de Rabobank in Utrecht. Dit is een groot gebouw met een gevel die geheel bestaat uit spiegeland, zonwerend (reflecterend) glas. In de tegenoverliggende woningen leidde dit tot een zodanige extra zoninstraling dat de directie van de bank zich genoodzaakt zag om alle bewoners gratis zonwering aan te bieden. Een ander voorbeeld is het Guggenheim museum in Bilbao. Hier wordt de spiegeling veroorzaakt door een metalen gevel.



Figuur 39 Dit gebouw reflecteert directzonlicht. Dit kan verblinding opleveren

3.2.8. Afmetingen van de ruimte

Wanneer de ruimteafmetingen veranderen, veranderen ook de verlichtingssterktes en de luminanties binnen de ruimte, bij gelijkblijvende lichtbron. Dit komt omdat dat het licht zich middels reflecties over de ruimte verspreidt. Nemen we als voorbeeld een diffuus stralende bol in een kleine, lichtgekleurde ruimte. Wanneer we die ruimte bijvoorbeeld twee keer zo groot maken, zullen we de scheidingsconstructies minder helder waarnemen. Ook de verlichtingssterkte in een punt recht onder de lichtbron is lager.



Figuur 40 De directe en indirecte component van een diffuus stralende lichtbron

De directe component van het licht zal in beide gevallen dezelfde zijn. Hiermee bedoelen we de lichtstroom die vanuit de bol, direct op een punt valt (zie figuur, punt in midden van tafelvlak). De indirecte component maakt het grote verschil. Er is eenvoudigweg meer oppervlakte aan scheidingsconstructies waardoor het

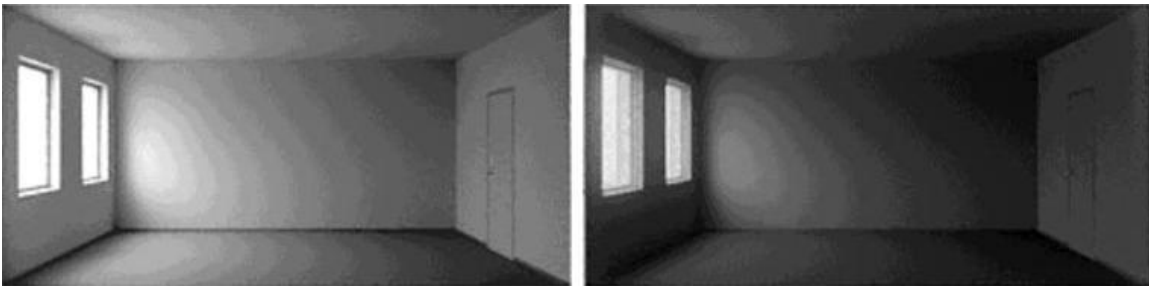
licht geabsorbeerd wordt. Daardoor komt er door reflectie minder licht in het punt. Als echter de ruimte hoger wordt en daarmee ook de lamp hoger komt te hangen dan zal ook de directe component in het punt op tafel kleiner worden (de inverse kwadraten wet).

Hebben we een lichtbron die niet diffuus stralend is maar juist een zeer smalle bundel heeft die zich recht boven het (meet)punt bevindt, dan zullen we zien dat de afmeting van de ruimte amper invloed heeft op de verlichtingssterkte, zeker als de reflectiefactoren van de ruimteafwerking zeer laag zijn. Er treedt vrijwel geen interreflectie op. In bovenstaand voorbeeld zouden we een raam ook kunnen opvatten als een lichtbron, waarbij de afmeting, de positie ervan in het gevelvlak, de geveloriëntatie, de tijd van de dag, de positie op aarde en de weersgesteldheid, maatgevend zijn voor de lichtstroom. We kunnen hierbij de diffuse component van het daglicht(het hemellicht) beschouwen als de indirecte component en het directe zonlicht als de directe component. Als vuistregel bij het ontwerpen van daglichtopeningen wordt aanbevolen om een ruimte niet dieper te maken dan 2,5 keer de hoogte van de daglichtopening.

Zie voor de invloed van de ruimteafmetingen ook wat er over het vertrekrendement onder installatietechnische maatregelen geschreven is (3.4).

3.2.9. Kleurgebruik en afwerking van de ruimte

De afwerking en inrichting van een ruimte bepalen in hoge mate hoe we die ruimte waarnemen. Het verschil tussen een witte ruimte en een zwarte ruimte is enorm. Zo lijkt een witte ruimte groter dan een even grote zwarte en moeten we het in een zwarte ruimte alleen hebben van direct licht; reflectie komt nauwelijks voor.



Figuur 41 Links een reflectiefactor voor wanden en plafond van 0,7 en rechts van 0,1

Als de afwerking van de omgeving met hoogglans wit afgelakt is, wordt de spiegeling van de lichtbron zichtbaar in het object.

Ook kleur beïnvloedt uiteindelijk de indruk van de ruimte. Zoals gezegd, het licht verspreidt zich over de ruimte middels reflecties; bij een matte reflecterende wand spat de lichtbundel als het ware uit elkaar en vervolgt zijn weg naar andere vlakken, waar weer hetzelfde gebeurt. Bij elk contact dat het licht met de wand maakt bepalen de eigenschappen van de wand uiteindelijk hoe het licht zijn weg vervolgt. Is het een donkerrode wand, dan zal zo'n 70% van het licht niet meer terug de ruimte in komen (zie tabel 2.8.). De overige 30% bestaat uit rood licht. De afwerking van een ruimte heeft daarom niet alleen invloed op de verdeling van de licht in de ruimte en dus op de verlichtingssterkte in een bepaald punt, maar ook op de sfeer van zo'n ruimte. Het licht dat op een gele wand valt,

reflecteert ook een geelachtig licht de ruimte in. Het licht neemt de kleur aan van z'n omgeving.

Tabel 2.8. Indicatie voor reflectiefactoren van verschillende kleuren.

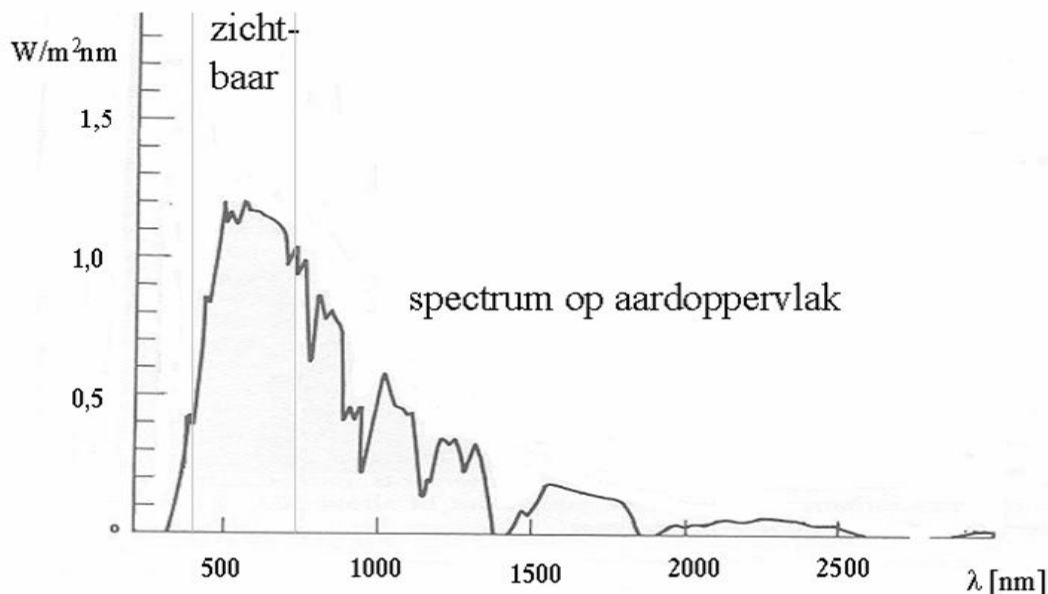
Kleur	Licht	Middel	Donker
Rood	0,3	0,18	0,1
Bruin	0,3	0,15	0,07
Geel	0,7	0,5	0,3
Groen	0,4	0,2	0,1
Blauw	0,6	0,3	0,1
Zwart	-	-	<0,04
Grijs	0,65	0,3	0,1

3.3. Berekenen van de hoeveelheid daglicht

Voorgaande paragrafen geven ons een indruk van de wijzen waarop we het licht kunnen sturen en beïnvloeden. Tot nog toe was de benadering vooral kwalitatief. Maar door aan die kwaliteiten getalwaarden te verbinden kunnen we voorspellen hoeveel daglicht er in een ruimte komt en waar. Met de meeste van de behandelde bouwkundige middelen kunnen we daglicht in de ruimte sturen. Het daglicht zelf (de bron) kunnen we niet beïnvloeden.

3.3.1. Wat is daglicht?

De zon zendt straling de wereldruimte in met een energieverdeling die ongeveer overeenkomt met het spectrum van een zwarte straler bij een temperatuur van 5500 K. Bij verwarming toteen zekere temperatuur zendt een zwarte straler het voor een temperatuurstraler bij die temperatuur maximaal mogelijke vermogen uit.



Figuur 42 Spectrale verdeling van het daglicht op het aardoppervlak

De irradiantie (EM-straling die op een vlak valt) op de buitenste rand van de atmosfeer van de aarde is 1,4 kW/m². Ongeveer de helft van dit vermogen wordt uitgezonden als zichtbare straling. De verlichtingssterkte (zie paragraaf 1.3.4.) bedraagt daar zo'n 170.000 lux. Hoewel de atmosfeer voor dit stralingsgebied goed transparant is, bereikt toch niet alle straling de aarde. Een deel van de straling wordt op haar weg door de atmosfeer verstrooid, en wel intensiever naarmate de golflengte van de straling kleiner wordt (Rayleigh-verstrooiing). Het is dus vooral de blauwe kant van het spectrum die in dit proces verstrooid wordt. De wolkenloze hemel, waarin vrijwel uitsluitend Rayleigh-verstrooiing plaats vindt, zien wij dan ook als blauw. De kleurtemperatuur (dit wordt uitgelegd in paragraaf 3.4.1.) van het licht van de wolkenloze blauwe hemel is op onze breedtegraad 10.000-26.000 K. Deze kortgolvlige straling wordt in feite aan het spectrum van het directe zonlicht onttrokken. De kleurtemperatuur van het directe zonlicht is daarom ook lager naarmate de afgelegde weg door de atmosfeer langer is (laagstaande zon is rood). Het spectrum en de verlichtingssterkte op aarde worden vaak in belangrijkere mate bepaald door meteorologische factoren, zoals verstrooiing, absorptie en reflectie door waterdamp, wolken en luchtverontreiniging.

Het diffuse licht van een volledig bedekte hemel is een mengsel van direct zonlicht en hemellicht. De verschillende componenten van het -buitenaardse- zonlicht worden dus voor een deel weer bijeen gebracht. De spectrale verdeling van het daglicht op een bepaalde plaats op aarde hangt derhalve af van de mengverhouding van direct zonlicht, hemellicht en licht van de wolken. Zoals we allemaal dagelijks merken varieert het daglicht continu. 's Ochtends vroeg, als de zon net op is, is er veel minder licht dan midden op de dag wanneer de zon zijn hoogste stand bereikt. Niet alleen het tijdstip op de dag bepaalt de hoeveelheid daglicht, maar ook het weertype. Bij een wisselend bewolkte dag kan het daglicht per seconde fluctueren. We praten over waarden variërend tussen 2000 en 50.000 lux. Daarnaast heeft de positie waar we ons bevinden op aarde invloed op de het daglicht. Iedere breedtegraad op aarde heeft een eigen zonnebaan-diagram

3.3.2. Daglichtfactor

Zoals gezegd fluctueert de hoeveelheid daglicht voortdurend. Om toch een indruk te krijgen van de hoeveelheid daglicht die door een daglichtopening een ruimte binnenkomt, maken we gebruik van de daglichtfactor (DF). De *daglichtfactor* op een bepaald punt in de ruimte is de verhouding tussen de horizontale verlichtingssterkte in dat punt en de horizontale verlichtingssterkte buiten in het vrije veld.

$$DF = \left(\frac{E_p}{E_{h.v.v.}} \right) * 100\%$$

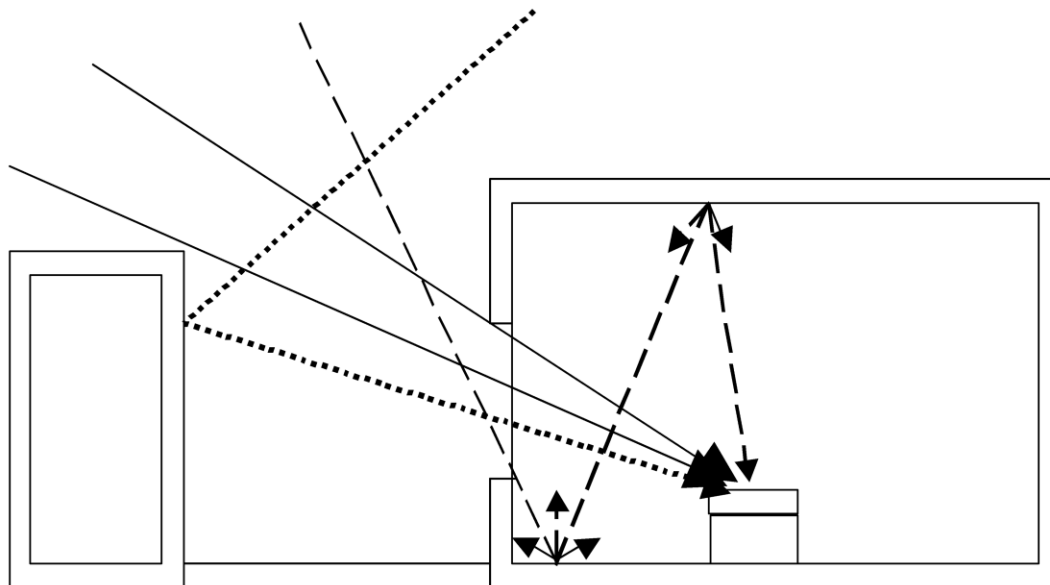
Waarin:

DF = daglichtfactor op een punt in een ruimte [%]

E_p = verlichtingssterkte op dat punt in de ruimte [lux]

E_{h.v.v.} = verlichtingssterkte buiten op het horizontale vlak in het vrijeveld [lux]

De daglichtfactor kan natuurlijk in een bestaand gebouw bepaald worden middels metingen. Meestal willen we echter tijdens het ontwerpproces kunnen voorspellen hoe groot de daglichtfactor is. Hiertoe zijn er twee mogelijkheden. De eerste is door een schaalmodel van het gebouw of de ruimte te maken en de verlichtingssterktes te meten onder een CIE-overcast sky (in de verlichtingswereld gestandaardiseerde, geheel bewolkte hemel). Bij de vakgroep BPS van de TUE is een CIE-overcast sky nagebootst in een zogenaamde 'daglichtkamer'. Van groot belang voor de bepaling van de E_p is dat het model goed overeenkomt met het te realiseren plan. Met name de reflectiefactoren binnen zijn van groot belang voor de E_p en dus ook voor de daglichtfactor. Als we in de maquette bijvoorbeeld in plaats van een lichte wand een donkere wand maken kan de E_p wel meer dan een factor 2 kleiner worden! Ook de aan/afwezigheid van aangrenzende gebouwen of groen speelt een belangrijke rol.



- d_h = Hemelcomponent
- $d_{e,r}$ = Externe reflectiecomponent
- - - $d_{i,r}$ = Interne reflectiecomponent

Figuur 43 Een punt in de ruimte krijgt het daglicht direct en via reflecties binnen

De tweede manier om de daglichtfactor te bepalen is door berekening:

De verlichtingssterkte in een punt in de ruimte is daardoor te benaderen met onderstaande formule:

$$E_p = (E_{z.h.} + E_{e.r.}) * C_r + E_{i.r.}$$

Waarin:

- E_p = verlichtingssterkte in een punt (p) van de ruimte [lux]
- $E_{z.h.}$ = verlichtingssterkte ten gevolge van de zichtbare hemel [lux]
- $E_{e.r.}$ = verlichtingssterkte ten gevolge van externe reflecties [lux]
- $E_{i.r.}$ = verlichtingssterkte ten gevolge van interne reflecties [lux]
- C_r = reductie t.g.v. lichtverlies door glas, vervuiling en roeden [-]

Een samenvoeging van deze twee formules levert de volgende formule op:

$$DF = \left(\frac{E_p}{E_{h.v.v.}} \right) * 100\% = (d_h + d_{e.r.}) * C_r + d_{i.r.}$$

Waarin:

- D_h = hemelcomponent
- $d_{e.r.}$ = externe reflectiecomponent
- $d_{i.r.}$ = interne reflectiecomponent
- C_r = correctiefactor voor lichtweerstand van de raamopening

Voor de reductie ten gevolge van niet al te dikke glasroeden wordt een correctiewaarde aangehouden van 0,9. Voor enkel glas wordt een reductie gehanteerd tussen de 0,85 en 0,90. Voor dubbel glas geldt een waarde tussen 0,7 en 0,8.

Tabel 2.9. Correctiefactoren voor glasvervuiling.

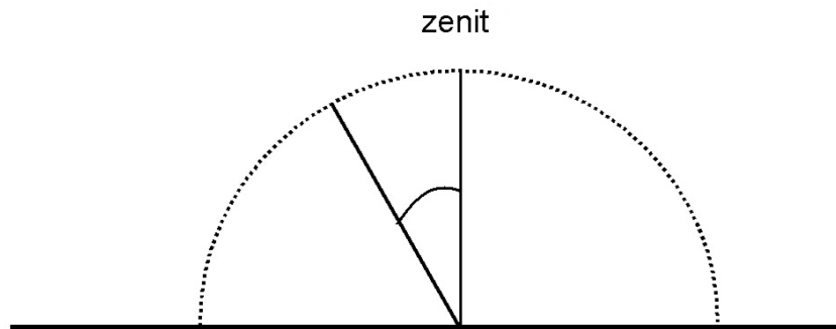
Omgeving	Verticaal glas	Hellend glas	Horizontaal glas
Schoon	0,9	0,8	0,7
Industrieel	0,7	0,6	0,6
Erg vuil	0,6	0,5	0,4

3.3.3. De bepaling van de hemelcomponent (d_h)

De *hemelcomponent* is de fractie van de verlichtingssterkte in het vrije veld, die verkregen wordt in een meetpunt ten gevolge van het directe hemellicht (dit is wat anders dan het directe zonlicht!) van het vanuit het meetpunt zichtbare hemeldeel, inclusief transmissieverliezen.

De hemelfactor wordt verkregen door uit te gaan van een afgesproken

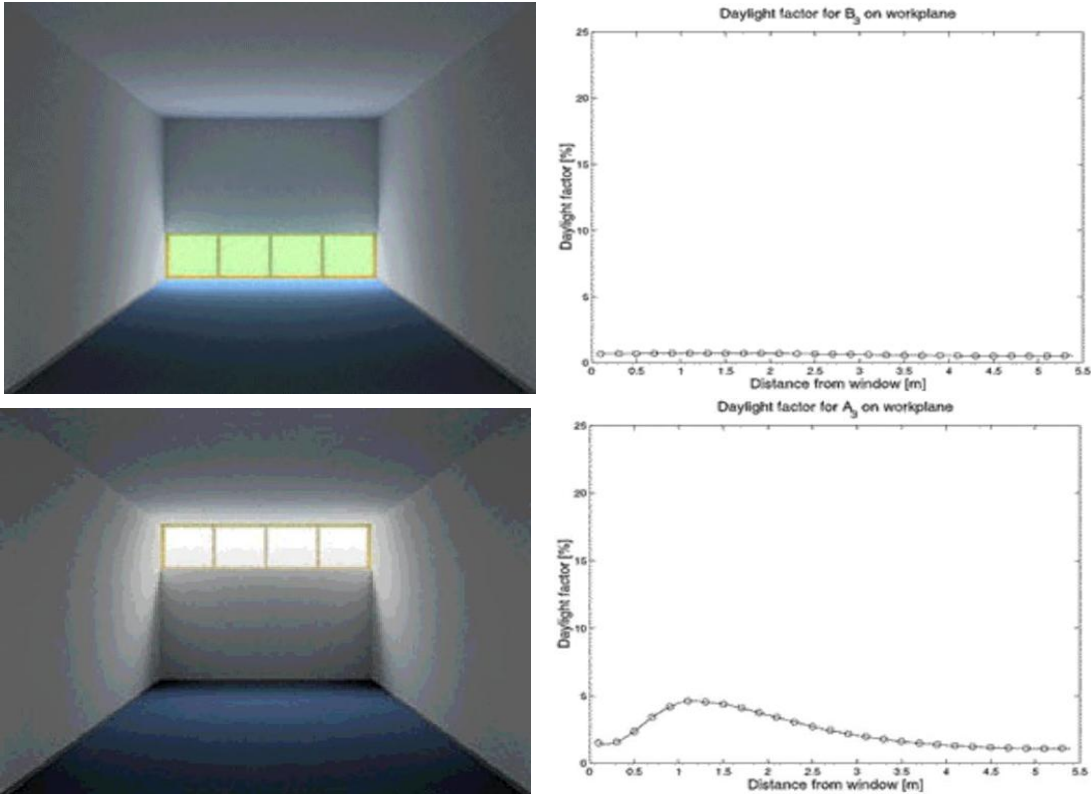
luminantieverdeling van de hemel. Hiervoor zijn verschillende benaderingen mogelijk. In landen waar het bijna altijd zonnig weer is, zal men uitgaan van de blauwe hemel als diffuse lichtbron, in combinatie met het gerichte licht van de zon. In het gematigde gebied waarin Nederland ligt en waar de hemel vaak bewolkt is, gaan we uit van een bewolkte situatie. Dit is de situatie waarbij het minste daglicht verwacht kan worden, waardoor we bij de berekening de minimale waarde van de hoeveelheid daglicht in de ruimte krijgen (worst case). De luminantie van een bedekte hemel is niet overal even groot. Op het oog lijkt de geheel bewolkte hemel egaal, maar resultaten van metingen geven aan dat gemiddeld in het *zenit* de luminantie driemaal zo hoog is als vlak boven de horizon.



Figuur 44 De zenit van de hemelkoepel bevindt zich loodrecht boven ons

Verder wordt aangenomen dat bij deze standaard bedekte hemel, de luminantie onafhankelijk is van de oriëntatie, dwz, de hemel rondom, op dezelfde hoogte, is overal even helder.

De hoeveelheid licht die binnenkomt in de ruimte hangt af van de afmeting van de daglichtopeningen. Het is logisch dat bij kleine ramen de daglichttoetreding kleiner is dan bij grote ramen.

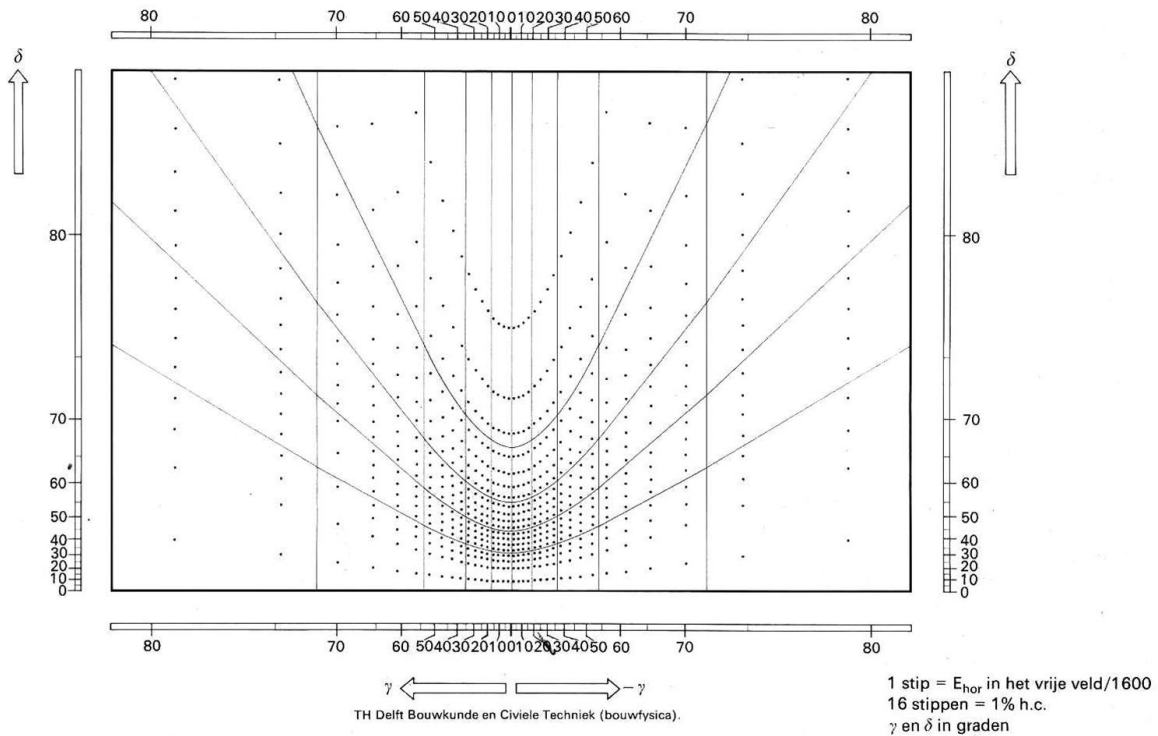


Figuur 45 Daglichtfactor op werkvlakhoogte bij een raam laag in de gevel in vergelijking tot een raam hoog in de gevel

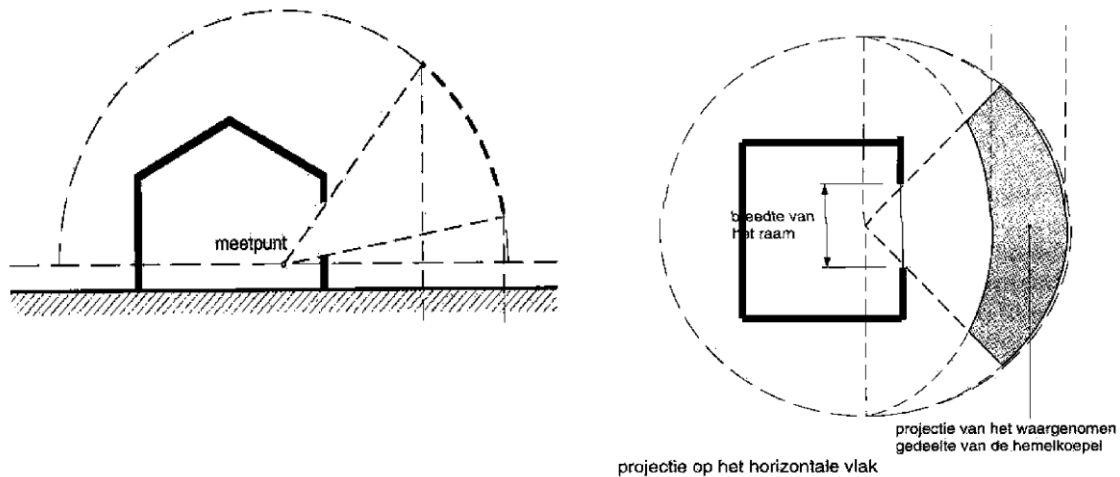
Vandaar dat het voor de hoeveelheid daglicht in een ruimte beter is om hoge smalle ramen te maken in plaats brede lage; hoe groter de hoek is ten opzichte van de normaal waaronder een lichtstroom op een vlak valt, hoe kleiner de verlichtingssterkte: de lichtstroom moet zich over een groter oppervlak verdelen.

3.3.4. Stippendiagram

Om de hemelcomponent te bepalen is een stippendiagram ontwikkeld. Hierbij wordt de hemelkoepel onderverdeeld in 1600 stippen, waarbij voor elke stip geldt, dat de bijdrage aan de hemelcomponent gelijk is aan $1/1600 = 1/16\%$. Voor het gemak is het stippendiagram door gebogen en rechte lijnen onderverdeeld in vakken die elk 16 stippen bevatten. Elk vak vertegenwoordigt een hemelcomponent van 1%. Indien we de grootte van de begrenzinghoeken van de gevelopeningen weten kan de hemelcomponent worden bepaald voor elke plaats in de ruimte.



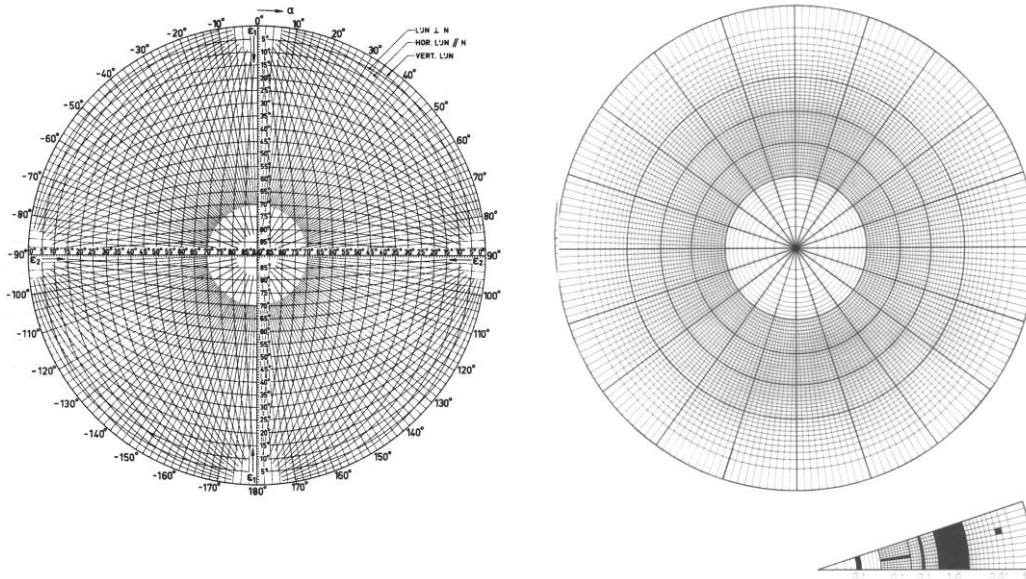
Figuur 46 Stippendiagram te bepaling van de hemelcomponent



Figuur 47 Projectie waargenomen deel van de hemelkoepel te bepaling van de hemelfactor

3.3.5. Radiaaldiagram

Een andere methode om de hemelcomponent te bepalen is met behulp van het zogenaamde radiaaldiagram. In een radiaaldiagram worden wederom de belemmeringhoeken van de daglichtopeningen in zowel het horizontale als het verticale vlak uitgezet. Door hier een transparant over te leggen met daarop de luminantieverdeling van een in ons geval een uniform bedekte hemel, kunnen we nu, door vakjes te tellen, de hemelcomponent in dat punt van de ruimte aflezen. Hierbij is de uniform bedekte hemel onderverdeeld in 10.000 vlakjes waarbij elk vlakje een hemelcomponent van 0,01% vertegenwoordigt.



Figuur 48 Radiaaldiagram en lucinantieverdeling van een uniform bedekte hemel

3.3.6. De externe reflectiecomponent ($d_{e,r}$)

De externe reflectiecomponent is afhankelijk van de luminantie van de belemmering. Ter vereenvoudiging kan worden gesteld, dat de bijdrage van gereflecteerd licht van de belemmering gelijk is aan 10 à 20% van de bijdrage van de hemelkoepel, die door de belemmering wordt afgeschermd, afhankelijk van de reflectiefactor van de belemmering. Dus bij een hoge reflectiefactor van de belemmering zullen we met 20% rekenen en bij een lage reflectiefactor met 10%.

$$d_{e,r} = d_{h,b,d} * \text{reflectiefactor}$$

waarin:

$d_{e,r}$ = externe reflectiecomponent [%]

$d_{h,b,d}$ = hemelfactor van het belemmerd deel [%]

reflectiefactor= reflectiefactor belemmering tussen de 0,1 en 0,2 zie tekst [-]

3.3.7. De interne reflectiecomponent ($d_{i,r}$)

Via interne reflecties tegen binnenwanden, vloeren en plafonds kan nog een aanzienlijke bijdrage geleverd worden aan het verlichtingsniveau in een punt van de ruimte. Zeker wanneer er voor een lichte afwerking is gekozen. De exacte waarde van de interne reflectiecomponent is niet eenvoudig te bepalen. Dit komt omdat het licht via reflecties uiteindelijk in het punt komt. Eigenlijk moet elke 'lichtstraal' gevolgd worden om de verlichtingssterkte exact te bepalen. Vanwege het groot aantal berekeningen en de complexiteit ervan worden hiervoor vrijwel altijd computerprogramma's gebruikt. Om toch een indicatie te krijgen van de bijdrage van de minimale interne reflectiecomponent aan de verlichtingssterkte,

heeft men een tabel (Tabel 2.10.) ontwikkeld waarin men deze waarden kan aflezen. Hierbij wordt uitgegaan van de reflectiefactor van de wanden, vloeren en plafonds in combinatie met de verhouding tussen de oppervlakte van het glas en van de vloer. De tabel is ontworpen voor een ruimte met een vloeroppervlakte van ongeveer 30 m², met een plafondreflectie van 0,7 en een belemmering voor het raam van 20°. Voor afwijkende vloeroppervlaktes en plafondreflectiefactoren worden correctiefactoren gebruikt evenals voor de gemiddelde reflectiecomponent.

Tabel 2.10. Minimale interne reflectiecomponent van de daglichtfactor bij een vloeroppervlak van ~30 m², een plafondreflectie van 0,7 en een raambelemmering van 20°.

Oppervlakte verhouding		Reflectiefactoren											
		Vloer: 0,1 wanden:				Vloer:0,2 wanden:				Vloer: 0,4 wanden:			
Glas:vloer	%	0,2	0,4	0,6	0,8	0,2	0,4	0,6	0,8	0,2	0,4	0,6	0,8
1:50	2	-	-	0,1	0,2	-	0,1	0,1	0,2	-	0,1	0,2	0,2
1:20	5	0,1	0,1	0,2	0,4	0,1	0,2	0,3	0,5	0,1	0,2	0,4	0,6
1:14	7	0,1	0,2	0,3	0,5	0,1	0,2	0,4	0,6	0,2	0,3	0,6	0,8
1:10	10	0,1	0,2	0,4	0,7	0,2	0,3	0,6	0,9	0,3	0,5	0,8	1,2
1:6,7	15	0,2	0,4	0,6	1,0	0,2	0,5	0,8	1,3	0,4	0,7	1,1	1,7
1:5	20	0,2	0,5	0,8	1,4	0,3	0,6	1,1	1,7	0,5	0,9	1,5	2,3
1:4	25	0,3	0,6	1,0	1,7	0,4	0,8	1,3	2,0	0,6	1,1	1,8	2,8
1:3,3	30	0,3	0,7	1,2	2,0	0,5	0,9	1,5	2,4	0,8	1,3	2,1	3,3
1:2,9	35	0,4	0,8	1,4	2,3	0,5	1,0	1,8	2,8	0,9	1,5	2,4	3,8
1:2,5	40	0,5	0,9	1,6	2,6	0,6	1,2	2,0	3,1	1,0	1,7	2,7	4,2
1:2,2	45	0,5	1,0	1,8	2,9	0,7	1,3	2,2	3,4	1,2	1,9	3,0	4,6
1:2	50	0,6	1,1	1,9	3,1	0,8	1,4	2,3	3,7	1,3	2,1	3,2	4,9

Tabel 2.11. Correctiefactoren voor ruimten met vloeroppervlak van ongeveer 10m² en 100m².

Vloeroppervlakte	Reflectie wanden			
	0,2	0,4	0,6	0,8
10m ²	0,6	0,7	0,8	0,9
100m ²	1,4	1,2	1,0	0,9

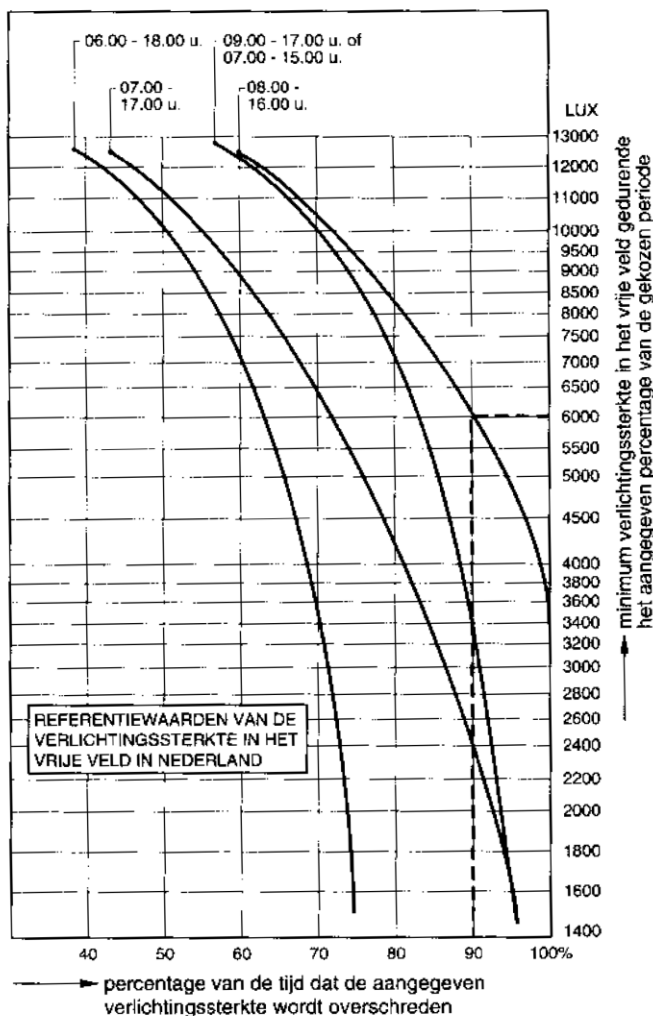
Tabel 2.12. Correctiefactoren voor verschillende plafondreflecties.

Reflectieplafond	Correctiefactor
0,4	0,7
0,5	0,8
0,6	0,9
0,7	1,0
0,8	1,1

Tabel 2.13. Correctiefactoren voor de *gemiddelde* interne reflectiecomponent.

Reflectie wanden	Correctiefactor
0,2	1,8
0,4	1,4
0,6	1,3
0,8	1,2

Nu deze waarden bekend zijn, kunnen we voorspellen hoe vaak in het jaar een bepaalde verlichtingssterkte in een bepaald punt van de ruimte gehaald kan worden. Er zijn vele daglichtmetingen in het verleden verricht die tot grafieken hebben geleid waarin we kunnen aflezen hoe vaak een zekere verlichtingssterkte in het vrije veld bij een bewolkte hemel in Nederland voorkomt.



Figuur 49 Verlichtingssterkte overschrijding in het vrije veld (Nederland) als percentage van de tijd

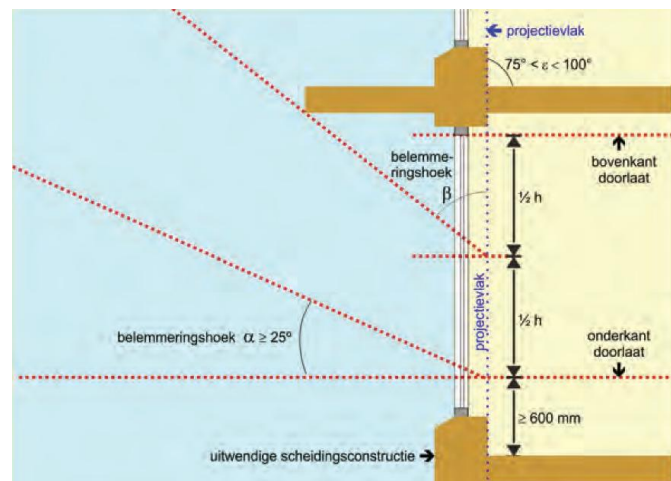
De daglichtfactor geeft helaas geen direct informatie over de aanwezige hoeveelheid daglicht op die plek. Daarvoor zijn statistische gegevens nodig die voor het betreffende klimaatgebied gelden. Wel wordt in de normen vaak gesproken over een daglichtfactor. De normen zijn vaak per land verschillend. In Nederland streven we naar een daglichtfactor van tenminste 2% in de woningbouw. De voorkeur voor ruimtes waar mensen werken gaat uit naar een daglichtfactor van minimaal de 5%. Onderstaande tabel (tabel 2.14.) geeft een indicatie wat een bepaalde daglichtfactor zegt over de beleving en de toepasbaarheid van een ruimte.

Tabel 2.14. Typische waarden voor daglichtfactoren.

Daglichtfactor	<1%	1%-2%	2%-4%	4%-7%	7%-12%	>12%
	Ze er laag	Laag	Redelijk	Gemiddeld	Hoog	Ze er hoog
Helderheidsindruk	Donker tot duister		Duister tot licht		Licht tot zeer licht	
Opmerkingen	Geschikt voor secundaire ruimtes gang, opslag etc		Geschikt voor werkruimte		Verblindingsrisico	
Sfeer	Ruimte staat niet in relatie met buiten			Ruimte staat in relatie met buiten		

3.3.8 Bouwbesluit en daglicht

In het Bouwbesluit worden (bepert) eisen gesteld aan de daglichttoetreding uit oogpunt van gezondheid. Er wordt niet gerekend met de daglichtfactor, maar met een vrij eenvoudige oppervlakte-eis. Voor woningen en woongebouwen moet de **equivalente daglichtoppervlakte** bepaald worden volgens NEN 2057. De eis is een daglichtopening ten minste gelijk zijn aan 10% van de vloeroppervlakte van het verblijfsgebied. Daarnaast moet per verblijfsruimte voldaan worden aan minimaal 0,5 m² equivalente daglichtoppervlakte. Voor kantoren gelden minimeisen van 2,5% en 0,5 m² en de eis dat naar buiten gekeken moet kunnen worden. Er moet bij de berekening rekening worden gehouden met "belemmeringen" zoals overstekken en muurtjes die de daglichttoetreding deels blokkeren. Dat geldt overigens alleen voor belemmeringen op eigen perceel! Voor het uitvoeren van een daglichtberekening volgens het bouwbesluit wordt naar het Praktijkboek Bouwbesluit 2012. Daarnaast wordt in de EPG ook rekening gehouden met daglicht, als vervanging van kunstlicht. Een goed daglichtontwerp kan het energieverbruik voor verlichting omlaag brengen.



Equivalent daglichtoppervlak

(bron:Praktijkboek Bouwbesluit 2012

3.4. Installatietechnische middelen

Installatietechnische middelen waarmee we licht in een ruimte brengen noemen we kunstlichtbronnen of lampen en het licht dat ze geven kunstlicht. We beperken ons hier tot lichtbronnen die hun licht afgeven door toevoer van elektriciteit. Als we weten wat we met het kunstlicht willen bereiken t.a.v. functie, vorm en sfeer (de te leveren prestaties), kunnen we ons richten op de vragen: op welke manier kunnen we het beoogde effect bereiken en wat voor lampen in welke armaturen (huis om de lamp) kun je daarvoor het beste gebruiken. Allereerst worden de meest voorkomende typen lampen en hun karakteristieken behandeld gevolgd door de verschillende typen armaturen. Daarna stappen en middelen om tot een goed verlichtingsplan te komen.

3.4.1. Lampen

Lampen laten zich op verschillende wijzen karakteriseren:

- naar het principe van lichtopwekking;
- naar de kleurtemperatuur van het uitgezonden licht;
- naar de kleurweergave van het uitgezonden licht;
- naar de toepassing.

Het principe van lichtopwekking

Zoals gezegd beperken we ons hier tot elektrisch opgewekt licht. De lichtopwekking van veruit de meeste van deze lampen vindt plaats doordat:

- elektriciteit door een gloeidraad stroomt;(temperatuurstralers)
- gas middels electriciteit tot ontlading komt (gasontladingslampen).

Van de eerste soort behandelen we beknopt de traditionele gloeilamp en de halogeenlamp. Van de tweede soort behandelen we de fluorescentielamp oftewel de kwikontladingslamp. Voorbeelden hiervan zijn de TL-buis en de spaarlamp.

1. De gloeilamp

In de gloeilamp zit een metalen draad (wolfram; hoog smeltpunt en lage verdampingssnelheid) die opgloeit wanneer daar een elektrische stroom wordt doorgevoerd; door wrijving van de elektronen in de draad wordt hij warm. Bij een temperatuur van ca 2800 K zendt deze draad EM-straling uit in het hele zichtbare gebied, met andere woorden het uitgezonden licht is een mengsel van alle kleuren. De specifieke lichtstroom kan worden vergroot door de gloeidraad te spiraliseren (kijk maar eens goed naar een gloeidraadje!). Door dimmen brengen we de temperatuur van de gloeidraad terug en verschuift het spectrum wat naar de langgolfige, dus warme kleuren. Bij het branden van de lamp verdampt het wolfram en slaat het neer aan de binnenzijde van de glazen bol. Daardoor neemt de lichtstroom van de lamp af. Dat verdampen gaat langzaam omdat in de bol een inert gas zit. Door de verdamping wordt de draad dunner tot hij tenslotte breekt wat het einde van de lamp betekent.

2. De halogeenlamp

De halogeenlamp is een gloeilamp met in de bol een halogeengas, meestal jodium. Het verdampte wolfram gaat, op weg van de hete gloeidraad naar de koudere bolwand, een verbinding aan met het jodium. Deze verbinding valt weer uiteen in de buurt van de gloeidraad (bij een temperatuur > 1970 K). Zodoende slaat het wolfram weer neer op de gloeidraad. Om dit proces op gang te houden is het nodig dat de wand van de bol niet te koud is. Daarom zijn halogeenlampen klein; de wand moet dicht bij de draad zitten zodat hij warm genoeg blijft. Door dit cyclische proces is de levensduur van een halogeenlamp twee- tot viermaal zolang als van een gewone gloeilamp. Tevens treedt vervuiling van de bolwand vrijwel niet op waardoor de lichtopbrengst bij een zelfde vermogen ongeveer tweemaal zo hoog is.

3. De fluorescentielamp

De fluorescentielamp is een lage druk kwikontladingslamp. Het gasmengsel (o.a. kwikdamp) in de buis wordt gebombardeerd met elektronen die wisselend naar de uiteinden (electroden) van de buis getrokken worden. Door de botsing die ontstaat tussen de elektronen en de gassen wordt er energie overgedragen. Als deze energie weer afgestaan wordt (ontladen) komt er energie vrij in de vorm van ultraviolette straling. Deze straling wordt door een dun laagje fluorpoeder (vandaar de naam fluorescentielamp) aan de binnenkant van de buis, omgezet in zichtbaar licht. De lamp straalt zichtbaar licht uit. De samenstelling van het fluorpoeder bepaalt in hoge mate de lichtstroom en de lichtkwaliteit (kleurtemperatuur en kleurweergave).

4. De spaarlamp

Een spaarlamp of compacte fluorescentielamp (CFL) kwam eind jaren 80 op de markt. De huidige (vierde) generatie spaarlampen is goedkoper te produceren en heeft een hogere efficiëntie dan eerdere versies. Spaarlampen zijn fluorescentielampen, net als TL-lampen. Een spaarlamp heeft een veel hoger lichtrendement dan een gloeilamp, én een veel langere levensduur. Nadelen zijn de (soms) minder goede kleurweergave, en de lampen bevatten kwik waardoor ze bij het chemisch afval thuishoren.

5. De LED-lamp

Een ledlamp is opgebouwd uit een groep van leds (licht-emitterende diodes). De karakteristieken van de toegepaste leds in de lamp bepalen samen met de stralingshoek de lichtstroom, lichtsterkte en kleurweergave. Ledlampen komen in verschillende modellen voor waaronder de vorm van een gewone gloeilamp met eventueel een gewone fitting.



Bij ledlampen zijn de lichtstroom (in lumen), de lichtsterkte (in candela) en de stralingshoek (in graden) gerelateerd. Bij een kleinere stralingshoek wordt de lichtsterkte (helderheid) groter terwijl de lichtstroom (hoeveelheid licht) niet verandert. Een ledlamp kan theoretisch ongeveer 50.000 branduren meegaan (een normale gloeilamp gemiddeld 1.000 branduren). In de praktijk blijkt

een ledlamp 20.000 tot 40.000 branduren mee te gaan. Vooral de eerdere modellen uit 2005-2007 kennen vroegtijdig uitval, anno 2009 zijn deze kinderziektes zo goed als verholpen. Omdat een ledlamp niet goed tegen hoge temperaturen kan hebben ledlampen die equivalent zijn aan bijv. de 60W gloeilamp altijd een aluminium koellichaam hebben om de warmte van de leds af te leiden. De eerste dimbare modellen zijn inmiddels op de markt. De huidige ledlamp geeft zo'n 50% van z'n opgenomen energie af in licht. Bij een spaarlamp of TL-Lamp is dit zo'n 35% en bij een gloeilamp 10%. De rest wordt afgegeven in warmte aan de omgeving.

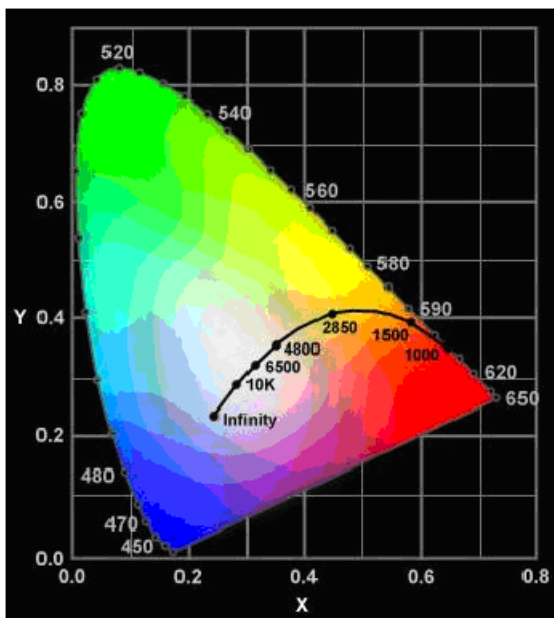
De kleurtemperatuur, T_k

De kleur van het licht dat door gloeilampen wordt uitgezonden is gerelateerd aan de temperatuur van hun gloeidraad. We kunnen dat zelf ervaren als we een gloeilamp dimmen. Door dimmen gaat de temperatuur van de gloeidraad omlaag en wordt er niet alleen minder licht uitgestraald maar verschuift de kleur van het licht van wit naar geel/oranje. Zouden we de stroomsterkte juist opvoeren en daarmee de draad warmer maken, dan zou de lichtkleur verschuiven naar blauwwit. De oranjewitte kleur ervaren we als warmer dan de blauwwitte kleur (terwijl de temperatuur van de gloeidraad juist bij blauwwit hoger is). Bij een gloeilamp is de lichtkleur dus gerelateerd aan de temperatuur van de gloeidraad. We spreken van de *kleurtemperatuur* (T_k) van een lamp; de lichtkleur wordt uitgedrukt in de erbij horende temperatuur van de straler, zoals de gloeidraad. Een normale gloeilamp heeft een lichtkleur van ongeveer 2800 K, de lichtkleur noemen we warmwit.

Zoals we gezien hebben werken gasontladingslampen anders. De kleur van het licht dat ze uitzenden is niet gerelateerd aan de temperatuur van een straler. Toch gebruiken we ook voor deze lampen het begrip kleurtemperatuur om hun lichtkleur aan te duiden. We vergelijken daarvoor het licht van een gasontladingslamp met dat van een temperatuurstraler. Als ze licht van dezelfde kleur uitstralen dan zeggen we dat de kleurtemperatuur van beide gelijk zijn; de lichtkleur van gasontladingslampen wordt dus gecorreleerd aan die van temperatuurstralers. Daarom spreken we bij gasontladingslampen van een gecorreleerde kleurtemperatuur.

De kleurtemperatuur in het ontwerpproces

Lichtbronnen met een lage kleurtemperatuur geven een warme indruk van de omgeving. In Scandinavische landen wordt vaak voor de werkomgeving de voorkeur gegeven aan een redelijk lage kleurtemperatuur. Dit geeft een gevoel van warmte en dus behaaglijkheid. In zuidelijke landen wordt juist de voorkeur gegeven aan een redelijk hoge kleurtemperatuur. Men vindt het aangenaam om veel licht te hebben in een wat blauwachtige kleur, zelfs in restaurants. Het koele licht wordt geassocieerd met verfrissing.



Figuur 50 De CIE-kleurendirehoek met daarin de zwarte straler kromme en de lijnen van constante, gecorreleerde kleurtemperaturen (2000-20000 K)

Bij een lage kleurtemperatuur worden de warmere (gele, rode) kleuren van materialen versterkt, terwijl bij een hogere kleurtemperatuur met name de blauwe meer uitgesproken worden. Dit kunnen we gebruiken in het ontwerp. Als we een warme sfeer willen maken, kunnen we het best gele, oranje en rode tinten gebruiken en deze verlichten door een lichtbron met een lage kleurtemperatuur (b.v. gloeilampen). Een wat zakelijker sfeer kunnen we creëren met veel blauw en grijs tinten, verlicht door redelijk veel en koel licht (Halogeen of fluorescentie met een hoge kleurtemperatuur).

De kleurweergave-index, R_a

Onze ogen zijn vertrouwd met daglicht en daarom vinden we dat daglicht de kleuren van onze omgeving goed weergeeft. Sommige lampen doen dat (veel) minder goed. Hoe goed lamplicht kleuren weergeeft kunnen we uitdrukken met de *kleurweergave-index* (symbool R_a). Dit is een dimensieloos getal tussen 0 en 100. Hoe de kleurweergave-index van een lamp bepaald wordt behandelen we hier niet. De kleurweergave speelt bij het ontwerpen van een verlichtingsinstallatie een belangrijke rol in een omgeving waar het bepalen van kleuren plaatsvindt. Voorbeelden waar kleurbeoordeling een belangrijke rol spelen zijn de grafische sector (drukkerijen, grafische ontwerpstudio's) en de mode-industrie, waar de combinaties van stoffen en kleuren worden bepaald.

Tabel 2.15. Waardering van de kleurweergave als functie van de kleurweergave-index.

R _a		Waardering van de kleurweergave
>	</=	
90	100	Zeer goed
80	90	Goed
50	80	Matig
20	50	Slecht

Alle temperatuurstralers, zoals gloeilampen, hebben een R_a van 100; ze zijn in staat om alle kleuren weer te geven. Dat komt door hun continue spectrum. Lichtbronnen die geen temperatuurstraler zijn, zoals bijvoorbeeld fluorescentielampen, hebben in principe, door het ontbreken van een continu spectrum, meer moeite met kleurweergave. Toch slagen fabrikanten erin ook met deze lampen een goede kleurweergave te bereiken. Maar niet altijd passen we deze lampen toe; een lamp met de beste kleurweergave is niet altijd de goedkoopste/energiezuinigste/duurzaamste. In situaties dat het met de kleurweergave niet zo nauw komt laten we argumenten van prijs, energiegebruik en duurzaamheid prevaleren.

Tabel 2.16. Toepassing van de verschillende kleurweergaven en kleurtemperaturen.

Kleurweergave-index R _a	Toepassingsvoorbeelden	Gewenste kleurtemperatuur T _k
>90	Klinisch onderzoek Grafische sector Kunstgalerie	3000-4000K >4000K
80-90	Woningen en hotels Restaurants en winkels Kantoren en scholen Sporthallen	2000-3000K 2500-4000K >4000K
60-80	Industriële werkzaamheden	Minder relevant
40-60	Zware industrie en terreinverlichting	Minder relevant

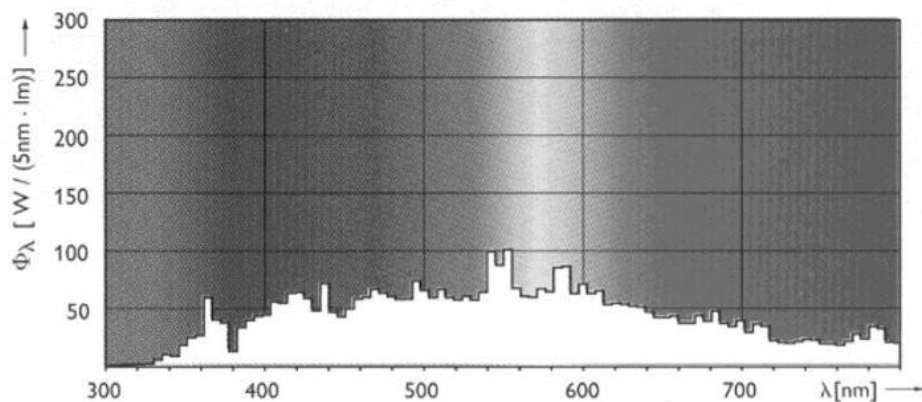
Er bestaan lichtbronnen die een zeer hoog rendement hebben (een hoge lumen/W waarde), maar een zeer slechte kleurweergave. Zeker voor situaties waar kleur een ondergeschikte rol speelt, zullen dergelijke lichtbronnen toegepast worden. Een voorbeeld hiervan vinden we langs (snel)wegen. Hier is het veel belangrijker dat we een verkeerssituatie snel kunnen inschatten; of een auto, die te snel op onze baan wil invoegen bruin of rood is, is dan niet belangrijk.

Voor het kunnen beoordelen van kleuren is het dus noodzakelijk om een zeer goede kleurweergave te hebben. Vandaar dat kleur ook vaak beoordeeld wordt

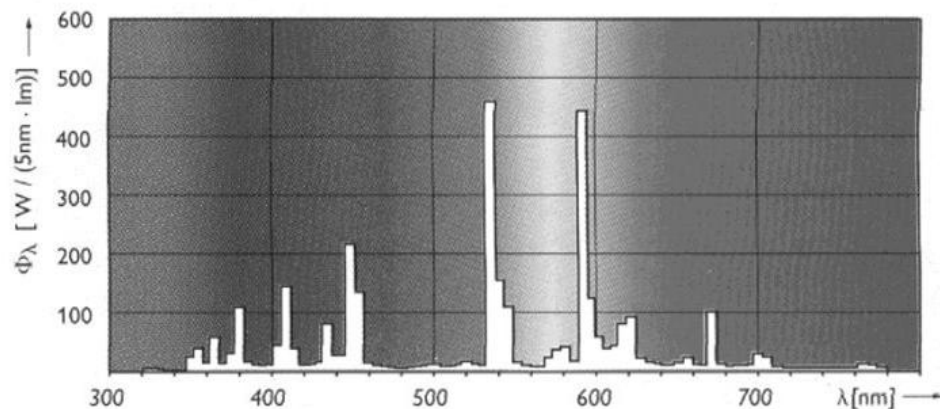
bij daglicht. Echter, daglicht fluctueert sterk. Niet alleen de hoeveelheid licht, maar ook de kleurtemperatuur van het licht. De oorzaak hiervan ligt in een veranderende breking van het zonlicht door de atmosfeer.

Om een goed oordeel te kunnen geven over de kleur van bijvoorbeeld een kledingstuk, is het van belang om te weten onder welk licht men het kledingstuk zal zien. Het lijkt het beste om een avondjurk onder daglicht te beoordelen omdat het een zeer natuurgetrouwe indruk geeft van de kleuren. Echter, normaal gesproken wordt een avondjurk 's avonds gedragen wanneer er in de meeste gevallen geen daglicht aanwezig is. Het is daarom beter om de jurk te beoordelen bij het licht dat aanwezig zal zijn in de situatie waarin men hem draagt; de felblauwe jurk die er bij het daglicht fris blauw uitziet, zal er in een met gloeilampen minimaal verlichte ruimte veel minder sprankelend uitzien.

MASTER MHN-SA 2000W/856



MASTER HPI PLUS



Figuur 51 Spectrale verdeling van twee verschillende lichtbronnen. De bovenste bestrijkt hele spectrum onderste het geel-rode.

De vorm van de lichtbron

Lampen zijn onder te brengen als puntbronnen en lijnbronnen. Een duidelijk voorbeeld van de eerste is het 'peertje', de meest gebruikte gloeilamp. Een duidelijk voorbeeld van de tweede is de TL-buis. Puntbronnen zijn er in zeer kleine uitvoeringen. De diameter van de bol van een laagspanning halogeenlamp

hoeft niet veel groter te zijn dan 5 mm. TL-buizen zijn er momenteel in standaardlengten van 135 tot 1500 mm.

Puntbronnen en lijnbronnen hebben verschillende karakteristieken waarvan gebruik gemaakt kan worden bij het maken van een plan voor kunstverlichting. Zo introduceert een lijnbron een richting in de ruimte. Dat kan bijvoorbeeld gebruikt worden om een ruimte breder/smaller te doen lijken, of om beweging te begeleiden. Denk aan een gang. Zie voor meer hierover onder armaturen. Daartegenover zullen puntbronnen meer toegepast worden om met het licht accenten te leggen. Denk hierbij aan spotverlichting in bijvoorbeeld het theater.

Toepassing van de lampen

Hier geven we enkele globale richtlijnen voor toepassing van de drie besproken lamptypen.

Fluorescentielampen

Fluorescentielampen worden met name toegepast in utiliteitsgebouwen. Oorspronkelijk hadden ze een hoge kleurtemperatuur met een zeer slechte kleurweergave (~50) en werden in woningen dan ook weinig toegepast. Tegenwoordig zijn er meer toepassingsmogelijkheden omdat fabrikanten erin geslaagd zijn fluorescentielampen te ontwikkelen met een warmere lichtkleur en omdat er allerlei vormen bijgekomen zijn. Er zijn fluorescentielampen met de vorm (en fitting) van een gewone gloeilamp (de zgn. spaarlamp). Daardoor is het mogelijk om veel armaturen te voorzien van een fluorescentielamp in plaats van een gloeilamp. Dat levert een besparing in het energiegebruik op; fluorescentielampen hebben een aanzienlijk hoger lichtrendement dan gloeilampen. Ze produceren dus ook veel minder warmte. Dat kan met name in gebouwen waar overdag veel kunstlicht nodig is belangrijk zijn: er kan bespaard worden op het energiegebruik voor verlichting en voor koeling. Dit zijn twee doorslaggevende redenen om in met name utiliteitsgebouwen op grote schaal fluorescentielampen toe te passen. Nog een doorslaggevende reden is de veel langere levensduur.

Tabel 2.17. Enkele lampeigenschappen (Philips Lighting)

Lamptype	Lampcode	Kleurtemperatuur, T_k	Kleurweergave, R_a	Lichtstroom, Φ	Lichtsterkte, I
Fluorescentie	TL'D 36W/835	3000K	85	3350 lm	-
Gloeilamp	Classictone 75W CL	2700K	100	930 lm	-
Laagspanning (20V) halogeen	Masterline ES50, 20W, 8D	3100K	100	-	6500cd

Gloeilampen

De gloeilamp vindt zijn toepassing vooral in woningen. De kleurweergave is uitstekend en de kleurtemperatuur is warmwit. Daarbij laat de gloeilamp zich gemakkelijk dimmen waarmee gemakkelijk een sfeer van intimiteit gecreëerd kan worden. Er zijn gloeilampen met gespiegelde bolwand waardoor bundeling van

uitgestraald licht wordt gerealiseerd. Het grote nadeel van de (gloedkoper) gloeilamp is dat het rendement laag is en de levensduur kort. Vanwege de problematiek van klimaatverandering wordt daarom tegenwoordig het gebruik van spaar- en LED-lampen aangemoedigd.

Halogeenlampen

Halogeenlampen zijn er voor laagspanning (6, 12 en 24 volt) en voor hoogspanning (220V). Voor de eerste groep is een transformator nodig. Deze halogeenlampen kunnen heel kleine afmetingen hebben. Het licht is door deze kleine afmetingen heel goed te bundelen (koudlichtspiegellamp). Daarom zijn ze bijzonder geschikt voor accentverlichting. Een bijzonder voordeel in de toepassing van laagspanningslampen is dat het snoer (van transformator helemaal naar de fitting) niet nodig is. De stroom kan gewoon door onderdelen van het armatuur.

Tabel 2.18. Gegevens voor de toepassing van lampen.

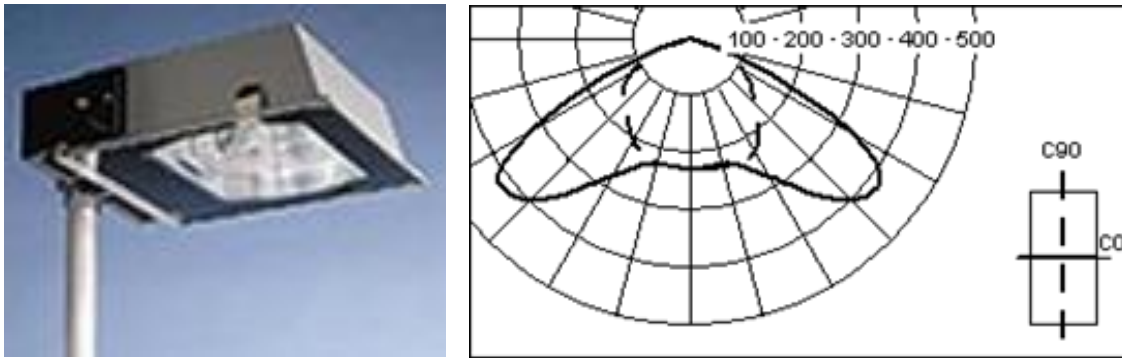
Lamp type	Rendement	Levensduur in branduren	Vermogen W	Dimmen	Bundelen van licht
Gloeilamp	η	1000	5-500	Goed	Goed
Halogeen-lamp	2η	2000-4000	5-150 60-250	Goed	Zeer goed
TL-lamp	$5-10 \eta$	8000-10000	4-80	Goed mits juist voorschakel apparaat	Minder goed

Halogeenlampen hebben een iets hogere kleurtemperatuur en net zoals de gewone gloeilamp een uitstekende kleurweergave. Ze laten zich goed dimmen maar dit kan wel de levensduur beperken omdat door het dimmen de halogeencyclus wordt verstoord (lagere temperaturen) waardoor het de eigenschappen krijgt van een normale gloeilamp. Overigens is het energieverbruik van halogeenlampen relatief hoog vergeleken met spaar- en ledlampen.

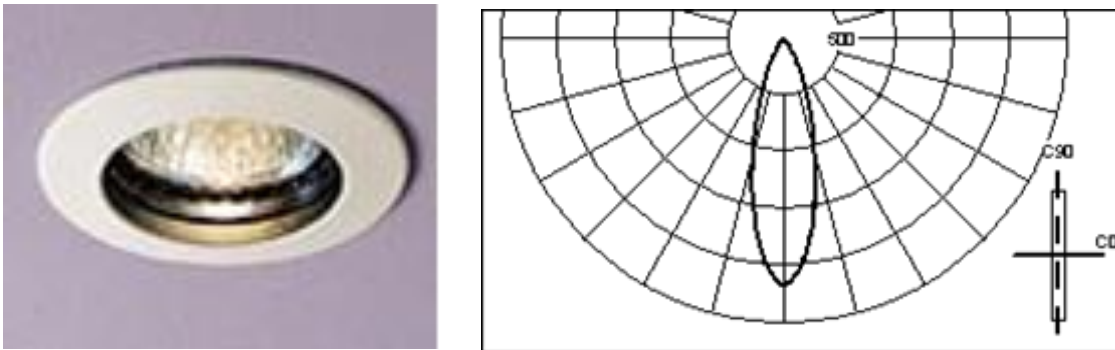
Armatuuren

Zelden passen we alleen lampen toe. Meestal stoppen we ze in een behuizing: de *armatuur*. Met een armatuur kunnen we het licht dat de lamp verlaat op verschillende manieren sturen. Als we een lamp plaatsen in een diffuus stralende bol, dan zal het licht zich gelijkmatig over zijn omgeving verspreiden. Door de lichtbron te plaatsen in een armatuur met een reflector krijgt het licht een richting. De vorm van de reflector bepaalt de vorm van de bundel. In de figuren staan enkele karakteristieke armatuurtypen afgebeeld en wordt iets over hun toepassingsmogelijkheid opgemerkt. Naast deze afbeelding staat steeds het bijbehorende lichtsterkediagram. Deze geven de lichtsterkte in de twee aangegeven doorsneden.

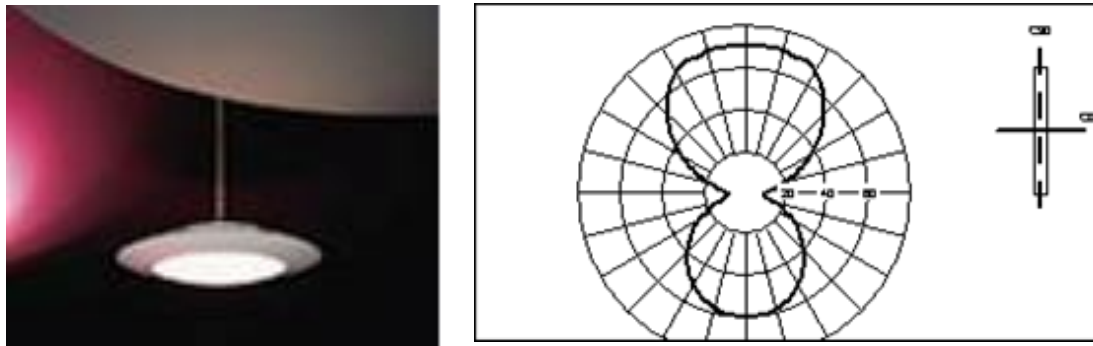
Armatuuren moeten er vaak ook voor zorgen dat de lichtbron, met zijn hoge luminantie, aan het oog onttrokken wordt zodat er geen verblinding optreedt.



Figuur 52 Breedstralend armatuur. Straatverlichting moet zorgen voor een egale spreiding



Figuur 54 Diepstralend armatuur. Spotverlichting geeft zeer gerichte accenten



Figuur 53 Combinatie tussen directe en indirecte verlichting. Zowel naar boven als beneden verlichting

De markt biedt een overweldigend grote keus aan armaturen. Het is hier niet de plaats om uitgebreid op deze keuzemogelijkheden in te gaan. Voor meer kennis daarover verwijzen we naar het vak 7S570 Praktische verlichtingskunde. We beperken ons ertoe erop te wijzen dat het altijd gaat om de goede combinatie van lamp en armatuur. Een combinatie die is afgestemd op de functie van de verlichting, op wat we willen dat het licht met de ruimte doet en op de sfeer die we er mee willen oproepen. Voor met name dat laatste is, naast een goede kleurtemperatuur van de lamp, een juiste armatuurkeus van groot belang.

3.5. Het maken van een kunstlichtplan

Met de plaatsing van kunstlichtbronnen zijn we heel wat vrijer dan met de plaatsing van ramen. Maar net zoals bij de bepaling van de positie van ramen dienen we bij de plaatsing van de lichtbronnen te weten wat we willen met het licht t.a.v. vorm (wat moet het licht met de ruimte doen), functie (hoe worden bijvoorbeeld onze oogtaken verlicht) en sfeer (welke sfeer willen we met het licht creëren/ondersteunen). In een goed verlichtingsplan zijn de 3 doelen op een integrale wijze gerealiseerd.

Bij het maken van een verlichtingsplan is het verhelderend de volgende toepassingen te onderscheiden.

Algemene verlichting

Dit is de verlichting die aangaat als we bij het binnenkomen in een vertrek het licht aandoen. Het is een basisverlichting die ons voldoende oriëntatiemogelijkheid, maar niet een te hoog verlichtingsniveau geeft.

Plaatselijke verlichting

De algemene verlichting is meestal onvoldoende om specifieke werkzaamheden bij uit te voeren zoals lezen, borduren, eten klaarmaken, etc. Daarom moeten we op de juiste plaatsen in aanvullende verlichting voorzien.

Accentverlichting

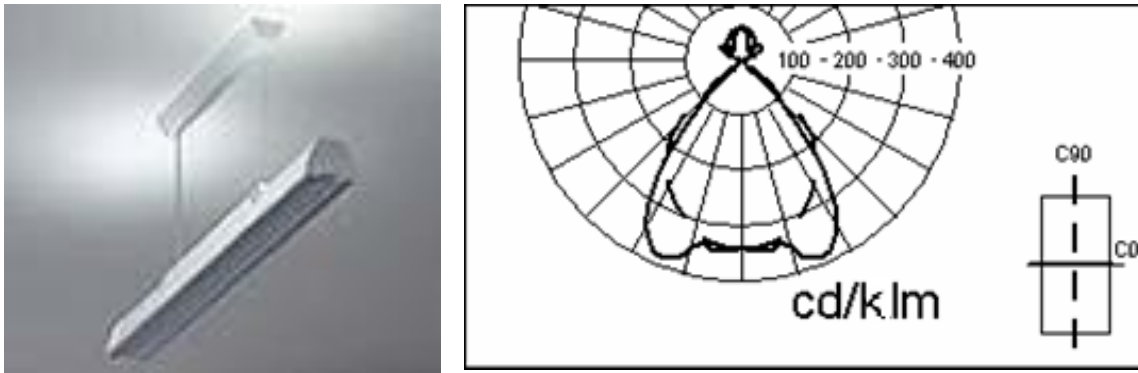
Deze verlichting kan gewenst zijn om ons oog te richten op dingen in het vertrek die extrawaardevol voor ons zijn zoals een schilderij, een meubel, een vaas bloemen of een mooi architectonisch element.

Achtereenvolgens behandelen we beknopt de gewenste hoeveelheid licht, de richting van de lichtstroom, de positie van de lichtbronnen en lichtbundeling.

3.5.1. De hoeveelheid licht

Zoals we in eerdere paragrafen al geconstateerd hebben speelt de hoeveelheid licht een belangrijke rol voor wat we kunnen zien. Is er veel licht, dan kunnen we beter kleine details onderscheiden. Te veel licht (of verkeerd gericht licht) kan echter weer verblinding veroorzaken.

Het vermogen van de lamp is van belang voor de elektriciteitsrekening en voor de warmtebalans van het vertrek; alle toegevoerde elektrische energie wordt immers uiteindelijk omgezet in warmte. Maar voor de hoeveelheid licht die wordt uitgezonden is het niet zo'n goede maat. Het lichtrendement van een lamp, het aantal lumen dat per watt wordt uitgezonden, kan immers nogal variëren. Over elke lamp geeft de fabrikant, naast informatie over het vermogen, informatie met betrekking tot de uitgestraalde lichtstroom. Deze stroom wordt gegeven in lumen (lm). Voor lampen die niet in alle richtingen evenveel licht uitzenden, zoals bijvoorbeeld gespiegelde lampen, wordt niet de lichtstroom gegeven, maar de lichtsterkte in het midden van de uitgestraalde lichtbundel (zie tabel 2.17).



Figuur 55 Polair diagram van pendel armatuur. Omdat de lichtsterkte niet in alle richtingen even groot is wordt hij uitgezet in twee richtingen

Voor de verlichtingsarmaturen wordt, zoals we gezien hebben, de lichtsterkte gegeven in polaire diagrammen. Omdat er vaak verschillende lamptypen in hetzelfde verlichtingsarmatuur toegepast kunnen worden, worden de polaire diagrammen weergegeven in cd per lumen.

Bij het bepalen van de gewenste hoeveelheid licht is de visuele taak die moet worden verricht een belangrijk criterium. Het gaat dan om de lichtstroom die valt op het object van onze taak, bijvoorbeeld de krant die we lezen, dus om de verlichtingssterkte ter plaatse.

Normen voor oogtaken en veiligheid zijn meestal gebaseerd op de minimaal benodigde verlichtingssterkte op een werkvlak. Zo wordt uit ergonomische overwegingen in een kantoorruimten een verlichtingsterkte op het horizontale werkvlak (0,75 m boven de vloer) aanbevolen tussen de 200 en 750 lux (zie tabel 2.19).

Tabel 2.19. Verlichtingssterkte en R_a voor kantoorwerk volgens norm NEN-12464.

Soort ruimte, taak of activiteit	Em [lux]	R_a [-]	Opmerkingen
Oriëntatieverlichting (P-garage, opslag)	50	80	Verlichting moet regelbaar zijn
Receptiebalie	300	80	
Kantoorwerk (schrijven, typen, lezen)	400	80	
Kleinere details (technisch tekenen)	750	80	
Conferentie en vergaderruimten	500	80	
Speciale werkplekverlichting (waarnemen zeer fijne details: inspectiewerk, operatietafel)	1600-3200		

Dat dit een redelijk breed gebied is heeft er mee te maken dat de benodigde verlichtingssterkte samenhangt met het soort werk dat er in kantoren gebeurt. Heeft men in een werkomgeving te maken met werkzaamheden waarbij men kleine objecten of kleine details moet kunnen onderscheiden, dan is het aan te bevelen om een hogere verlichtingssterkte te kiezen. Voor normale kantoorwerkzaamheden wordt 500 lux op werkvlakniveau aanbevolen. Om de overgang wat betreft lichtniveau niet te groot te maken tussen een werkruimte en

een circulatiegebied, wordt voor een circulatiegebied dan een verlichtingssterkte aanbevolen rond de 200 lux.

Bij de bepaling van de gemiddelde verlichtingssterkte voor het uitvoeren van bepaalde oogtaken, wordt geen onderscheid gemaakt tussen het licht afkomstig van daglichtopeningen en het licht dat afkomstig is van kunstlichtinstallaties. Wel is het natuurlijk zo, dat als het in de winter om 5 uur donker is, men ook nog voldoende licht heeft!

3.5.2. Plaats van de lichtbronnen

Bij beslissingen over de positie van lichtbronnen is het goed rekening te houden met vorm, functie en sfeer.

Vorm

Net zoals met dag- en zonlicht kunnen we met kunstlicht de vorm van de ruimte manipuleren. De algemene verlichting kan bijvoorbeeld bestaan uit lampen die het plafond aanlichten. Dat heeft natuurlijk alleen zin als het plafond een lichte kleur heeft. Dan zal de ruimte hoger lijken dan wanneer de algemene verlichting bestaat uit armaturen die aan het plafond hangen en het licht naar beneden stralen. In het algemeen geldt dat het aanlichten van wanden en plafonds de ruimte groter maakt en tegelijk de ruimte als vorm benadrukt. Daar staat tegenover dat verlichting die wanden, en met name hoeken in het donker laat, de ruimtevorm in het midden laat. Een voorbeeld van het laatste is de lamp boven de eettafel van zo'n 40 jaar terug. Deze lamp was tegelijk algemene en plaatselijke verlichting. Een dergelijke wijze van verlichten geeft wel een sfeer van intimiteit.

Een bijzonder effect van op vorm gerichte verlichting geeft strijklicht. Met strijklicht, licht dat langs een vlak als bijvoorbeeld een wand strijkt, kunnen we de structuur van het oppervlak zichtbaar maken. Door de schaduw die oneffenheden opleveren krijgen we meer informatie over de wand.

Functie

Samen met accentverlichting maakt plaatselijke verlichting de ruimte levendiger; er is meer lichtcontrast in de ruimte. Plaatselijke verlichting is gericht op ondersteuning van de oogtaken die in de ruimte gebeuren. We moeten dus goed een beeld hebben van hoe de ruimte gebruikt wordt. Voor kantoorgebouwen is dat zowel overdag als 's avonds, voor woningen vooral 's avonds.

Sfeer

Allereerst is er natuurlijk de keus van de armatuur. De mogelijkheden zijn zeer groot. Net als andere interieurelementen als meubelen is er bij elke gewenste sfeer wel een armatuur op de markt.

Daarbij is de keus van de lamp belangrijk en dan met name de kleurtemperatuur. Gloeilampen, zeker als ze gedimd zijn geven een warme kleur, passend bij een huiselijke, gezellige sfeer. TL-lampen geven vaak een wat witter licht dat meer past bij een zakelijke omgeving. Overigens zijn er ook TL-lampen verkrijgbaar die warmer licht uitstralen.

3.5.3. Richting van het licht

Tot in de jaren '50 van de vorige eeuw was het de normaalste zaak dat men in de woonkamer slechts één lamp had, die boven de eettafel hing waaromheen de hele familie zich 's avonds verzamelde; moeder was de sokken aan het stoppen, vader las de krant en de kinderen waren huiswerk aan het maken. De rest van de woonkamer was donker.



Figuur 56 Een olielampje boven de tafel verlichtte de avondmaaltijd

De toegenomen welvaart en de uitgebreide keuze aan lichtbronnen en armaturen, heeft er toe geleid dat we doorgaans meer lampen gebruiken om ons interieur te verlichten. Daarmee ontstaat de vraag hoe we die lampen over de ruimte verdelen.



Figuur 57 De richting van het licht bepaalt in sterke mate de indruk van een ruimte. Links naar beneden gericht en rechts uplighters (<http://gaia.lbl.gov/rid>)

Door interreflecties van vloeren, wanden en plafond wordt het licht verdeeld over de ruimte. Het uiteindelijke effect is afhankelijk van soort en plaats van lampen/armaturen en de reflectiefactoren van de scheidingsconstructies.

- Verlichting wordt vaak in of aan het plafond geplaatst mede ook omdat het op die manier niet in de weg staat of hangt. Als het armatuur de lichtstroom naar beneden richt blijft het plafond, ten opzichte van de vloer en het meubilair donker blijft, waardoor de ruimte optisch verlaagd wordt. Dit wordt nog eens versterkt als het plafond een donkere kleur heeft.
- Door te werken met verlichting die het licht naar het plafond stuurt (uplighters genoemd) wordt de ruimte optisch verhoogd. Daarnaast wordt, omdat het plafond en de wanden gebruikt worden als diffuus reflectievlak, het licht gelijkmatiger verdeeld over de ruimte. Uitgaande van lampen met dezelfde lichtstroom zal op het werkvlak de verlichtingssterkte lager zijn. De ruimte maakt echter een lichte indruk; plafond en wanden hebben een hogere luminantie. Als er hoge eisen gesteld worden aan de verlichtingssterkte op tafelhoogte is deze oplossing echter niet erg energiezuinig omdat er meer lampen nodig dan bij toepassing van neerwaarts gerichte armaturen. Doordat het diffuse licht via meerdere reflectievlakken verspreid wordt over de ruimte, zal het contrast tussen lichte en donkere schaduwvlakken kleiner zijn. Dit kan gunstig zijn voor ruimtes waar men grote helderheidscontrasten wil voorkomen, zoals bijvoorbeeld in kantoren (vuistregel 1:3:10). Voor plekken waar we juist grote contrasten willen maken zoals in duurdere winkels, kan het minder geschikt zijn.
- Door te spelen met de positie van het licht kunnen we bepaalde ruimtelijke effecten versterken of juist afzwakken. Nemen we als voorbeeld een lange smalle gang. We kunnen de lengte van die gang versterken door aan het plafond lijnverlichting te plaatsen. De lengte zou juist afgezwakt kunnen worden door de armaturen juist dwars op de lengte van de gang te plaatsen of te werken met puntbronnen. Hierdoor ontstaan als het ware een opdeling van de lengte in segmenten. Een andere mogelijkheid is de verlichting niet in het midden van de gang te plaatsen maar juist enigszins naar de wanden toe gericht. Hierdoor ontstaan ook segmenten maar wordt tevens de engte van de gang onderdrukt; donker komt op je af, terwijl licht juist optisch groter maakt.



Figuur 58 Door met de positie, de richting en de bundel van het licht te spelen ontstaan er totaal andere indrukken van een ruimte

- Modelling noemen we het verschijnsel dat licht textuur en vorm van een voorwerp uit laat komen, door patronen van licht en schaduw te creëren. In de praktijk wordt meestal het engelse woord 'modelling' gebruikt. Licht dat van alle kanten komt (diffuus licht) zal een vervlakking geven van de vorm en een verlies van detail. Modelling speelt een grote rol in situaties waarin mensen elkaar goed willen zien, bijvoorbeeld tijdens besprekingen. Communicatie gaat immers niet alleen verbaal, maar voor een belangrijk deel ook non-verbaal. Het juist kunnen zien van de mimiek is geeft aanvullende informatie. Aan gelaatsuitdrukking kunnen we vaak redelijk goed afleiden of iemand oprecht is of aan het liegen is. Het meest natuurlijke licht voor de modelling van gezichten wordt verkregen door een combinatie toe te passen van diffuus, algemeen licht, aangevuld met gericht licht boven het gezicht en schuin van voren. In feite is dit ook het licht dat buiten veelvuldig voor zal komen; diffuus licht van de hemelkoepel, aangevuld met direct licht van de zon.
- Naast het belang van modelling voor het menselijke gezicht, speelt modelling ook een belangrijke rol in bijvoorbeeld beeldende kunst. Wanneer we een beeld heel diffuus verlichten, zullen dieptes vervagen, terwijl, wanneer we een zeer gerichte lichtbundel op hetzelfde object richten, we door de schaduwwerking juist wel diepte zullen zien. De richting het licht heeft ook grote invloed op de modelling.



Figuur 59 Verschillende richtingen van het licht hebben invloed op de modelling

Een gezicht dat van onderaf verlicht wordt geeft vaak een zeer onnatuurlijke, zelfs spookachtige indruk van een persoon. Dit komt omdat we er niet aan gewend zijn dat het licht van onderen komt.

3.5.4. Het bundelen van licht

Het bundelen van licht biedt de volgende mogelijkheden.

1. We kunnen grote contrasten aanbrengen in een ruimte. Hierbij kan gedacht worden aan bijvoorbeeld het aanlichten van kunst door middel van spotverlichting; Het oog stelt zich automatisch in op de grootste helderheid uit z'n omgeving. Hierdoor wordt direct de aandacht getrokken naar het kunstobject. Zeker als de rest daarbij relatief donker blijft.

2. Door een smalle bundel toe te passen kunnen we over een grotere afstand een bepaalde hoeveelheid licht transporteren. Natuurlijk neemt de hoeveelheid licht kwadratisch af met de afstand, maar de ruimtehoek is veel kleiner, zodat we over een grotere afstand relatief meer licht overhouden.

Om het visuele effect van een spot aan te geven, maakt men gebruik van de *contrastfactor*. Deze contrastfactor schrijven we als:

$$C = \frac{E_{object}}{E_{achtergrond}}$$

Waarin:

C = contrastfactor [-]

E_{object} = verlichtingssterkte van het object [lux]

$E_{achtergrond}$ = verlichtingssterkte van de achtergrond [lux]

Tabel 2.20. Effect van de verschillende contrastfactoren.

Contrastfactor	Effect
2	Merkbaar
5	Laag teatraal
15	Theatraal
30	Dramatisch
50	Zeer dramatisch



Merkbaar
Factor 2:1

Theatraal
Factor 15:1

Zeer dramatisch
Factor 50:1

Figuur 60 Verschillende contrastfactoren van een aangelicht object

3.5.5. Berekenen van het aantal armaturen

Voor het berekenen van de verlichtingssterkte op een bepaald punt in de ruimte kunnen we gebruik maken van de inverse kwadratenwet zoals behandeld in paragraaf 1.4.4. Zijn er meer kunstlichtbronnen in de ruimte, dan kunnen we de voor een punt in die ruimte de bijdrage van elke lichtbron berekenen en deze waarden bij elkaar optellen. Op deze wijze berekenen we echter alleen de directe component van de lichtbronnen en missen we de bijdrage aan de verlichtingssterkte door het licht dat van plafond en wanden komt. Of dit erg is, met andere woorden, of de indirecte bijdrage relatief groot is, hangt van de ruimtevorm af en van de reflectiefactoren van plafond, wanden en vloer. Voor het in rekening brengen van de indirecte bijdragen door reflectie zijn grote rekenprogramma's nodig. We behandelen hier een eenvoudige handberekeningsmethode waarmee we voor rechthoekige ruimten het benodigd aantal armaturen kunnen berekenen, uitgaande van de gewenste horizontale verlichtingssterkte. De formule waarmee we dit doen ziet er als volgt uit:

$$N = \frac{E_{gem} * A}{\Phi_n * \eta}$$

Waarin:

- N = vereist aantal armaturen [-]
- E_{gem} = gemiddelde verlichtingssterkte na veroudering [lux]
- A = vloeroppervlakte per ruimte [m²]
- Φ_n = nominale lichtstroom per armatuur [lum]
- η = verlichtingsrendement [-]

We zien dat er in deze formule een aantal grootheden voorkomen die we nog niet eerder behandeld hebben. Onder de **nominale lichtstroom** Φ_n per armatuur verstaan we de totale lichtstroom van de lampen die zich in het armatuur bevinden na veroudering en vervuiling. In een verlichtingsarmatuur kunnen 1 of meerdere lampen geplaatst worden. Elke lamp heeft z'n eigen specifieke lichtstroom. Voor bepaling van de nominale lichtstroom tellen we de afzonderlijke lichtstromen bij elkaar op. Lichtbronnen hebben aan het einde van hun levensduur een lagere lichtstroom dan aan het begin ervan. Omdat we in bovenstaande berekening er zeker van willen zijn dat aan het einde van de levensduur van de lichtbronnen ook nog de gewenste verlichtingssterkte bereikt wordt, houden we rekening met een verouderingsfactor, ook wel depreciatiefactor genoemd. Deze verouderingsfactor hangt af van het soort lichtbron. Gemiddeld genomen wordt gerekend met een waarde rond 0,85. (Dit wil dus zeggen dat de lichtstroom aan het einde van de levensduur met zo'n 15% is afgenomen!).


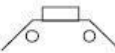




Onder het **verlichtingsrendement** verstaan we de verhouding van de nuttige lichtstroom op een bepaald vlak (bijvoorbeeld de tafel) tot de nominale lichtstroom van de toegepaste lampen. Hij wordt bepaald door het product van het armatuurrendement en het vertrekrendement.

$$\eta = \eta_{\text{vertrek}} * \eta_{\text{armatuur}}$$

Waarin:

- η = verlichtingsrendement [-]
- η_{vertrek} = vertrekrendement [-]
- η_{armatuur} = armatuurrendement [-]

Het **armatuurrendement** is de verhouding tussen de door het armatuur uitgezonden lichtstroom en de door de lichtbronnen geproduceerde lichtstroom. Ter indicatie zijn hieronder een aantal waarden opgenomen:

Armatuur type	Armatuurrendement
a  balk	0.96
b  trog	0.81
c  lamellen rooster	0.59
d  prismakap	0.57
e  opaalkap	0.54
f  spiegel optiek	0.56

Tabel 2.21: Armatuurrendementen (Bron: Bouwfysica, v/d Linden)

Bij het **vertrekrendement** spelen de lengte, breedte en hoogte ruimte een belangrijke rol, alsmede de reflectiefactoren van de scheidingsconstructies. Hoe groter lengte en breedte van de ruimte en hoe hoger de reflectiefactoren, des te minder licht wordt er geabsorbeerd, althans relatief gezien, dus des te hoger is het vertrekrendement. Hoe hoger de ruimte daarentegen, des lager is het vertrekrendement (verklaar!).

Om het vertrekrendement te bepalen hebben we dus de afmetingen van de ruimte nodig en de reflectiefactoren. De invloed van de afmetingen is verdisconteerd in de **ruimte-index** (k), zie hieronder.

$$k = \frac{l * b}{(l + b) * h}$$

Waarin:

- k = ruimte-index
- l = lengte ruimte [m]
- b = breedte ruimte [m]
- h = hoogte ruimte [m]

Ter bepaling van het vertrekrendement berekenen we eerst de *ruimte-index* van de ruimte. Als we dan ook de reflectiefactoren van plafond, wanden en vloer weten kunnen we in tabel 2.22 het vertrekrendement kunnen opzoeken.

Tabel 2.22. Voorbeeld van vertrekrendement van breedstralend plafondbouw armatuur.

Ruimte-index k	Reflectiefactoren									
Plafond	0,8	0,8	0,8	0,8	0,5	0,5	0,5	0,5	0,3	0
Wanden	0,5	0,5	0,3	0,3	0,5	0,5	0,3	0,3	0,3	0
Vloer	0,3	0,1	0,3	0,1	0,3	0,1	0,3	0,1	0,1	0
0,6	0,52	0,49	0,43	0,42	0,49	0,48	0,42	0,41	0,41	0,35
1,0	0,73	0,67	0,64	0,60	0,69	0,65	0,61	0,59	0,58	0,52
1,5	0,89	0,81	0,81	0,75	0,83	0,78	0,77	0,73	0,72	0,66
2,0	0,97	0,86	0,89	0,81	0,90	0,83	0,84	0,79	0,78	0,73
3,0	1,07	0,94	1,01	0,90	0,99	0,91	0,94	0,88	0,86	0,81
5,0	1,16	1,00	1,11	0,97	1,06	0,96	1,02	0,94	0,93	0,88

Voorbeeld: Klaslokaal

Afmetingen lokaal: 7 x 7 x 2,5 m(hoogte werkvlak tot aan plafond)
Armatuurtype: Breedstralende plafondarmaturen 2 x 36 W TL;
 $\eta_{\text{armatuur}} = 0,59$ (zie tabel 2.21)
Lichtstroom: (zie blz. 13) $\Phi_n = 2 \text{ TL's} \times 36 \text{ W} \times 93 \text{ lm/W} = 6696 \text{ lm}$
Reflectiefactoren: plafond 0,8; wanden 0,5; vloer 0,1

Ruimte-index: $k = (7 * 7) / (7 + 7) * 2,5 = 1,4$

Vertrekrendement: $\eta_{\text{vertrek}} = 0,78$ (tabel, kolom 2, interpoleren tussen 0,67 en 0,81)

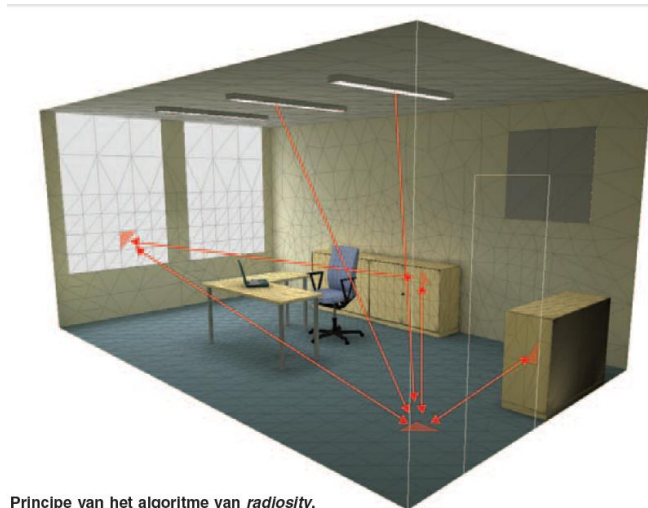
Gevraagde verlichtingssterkte op het werkvlak: 400 lux (uit tabel 2.19)

Aantal armaturen: $N = (E * A) / (\Phi_n * \eta_{\text{vertrek}} * \eta_{\text{armatuur}})$
 $N = (400 * 49) / (6696 * 0,78 * 0,59) = 6,4$

Dus minstens 7 armaturen, om een mooie verdeling te krijgen worden dat er in de praktijk 8.
Bereken vervolgens de gemiddelde verlichtingssterkte in het lokaal als er inderdaad 8 armaturen worden toegepast!

3.5.6. Software

Tegenwoordig wordt nog maar weinig gebruik gemaakt van deze handrekenmethodes. Er zijn diverse lichttechnische simulatieprogramma's (DIALUX, Relux, Radiance) vaak als shareware. De meeste verlichtingsfabrikanten stellen gratis databases beschikbaar (downloadens), die gebruikt kunnen worden in deze simulatieprogramma's, zodat berekeningen gemaakt kunnen worden voor hun armaturen (bijv. Philips, Etap en Osram).



Principe van het algoritme van radiosity.
Bron: WTCB-Dossiers 2011/3.18

4. Literatuur

4.1. Boeken en Dictaten

Dictaat Bouwfysica-licht	drs. A.J.F. Rutten	2000
Bouwfysica	ir. A.C. van der Linden	1998
Light: The Shape of Space	Lou Michel	1995
Daglicht/Kunstlicht	C. van Santen/ir. A.J. Hansen	1989
Licht in de architectuur	C. van Santen/ir. A.J. Hansen	1985
Correspondence Course Lighting Application,	Philips Lighting	1988
Ondergronds Bouwen (O 105),	Centrum Bouwonderzoek TNO TUE	1999
Lighting Handbook, Reference & Application,	IESNA, Mark S. Rea	1993
Daylighting in Architecture,	Commission of European Comm.	1993
NEN 3087 Visuele ergonomie in relatie tot verlichting,	Principes en toepassingen	1991
NEN 1890 Binnenverlichting Functionele eisen		1991
Catalogus Binnenverlichting,	Philips	1998
Lichtpocket 2002,	Osram	2002
Zakboek Ergonomie	Ir. P. Voskamp & ir. C. Schilder	2002
Interessante literatuur:		
Daglicht in het ontwerp van utiliteitsgebouwen,	SBR	2003
Daglichtsystemen + visueel comfort,	SBR	2000

4.2. Websites

Licht ontwerpondersteuning

- <http://sts.bwk.tue.nl/daylight/>
Ook voor kunstlicht: de kunstlichtmodule is het afstudeerwerk van Koert Ringeling die bij ons (HU Bouwkunde) is afgestudeerd.

Verlichtingsfabrikanten en downloads berekeningsprogramma's

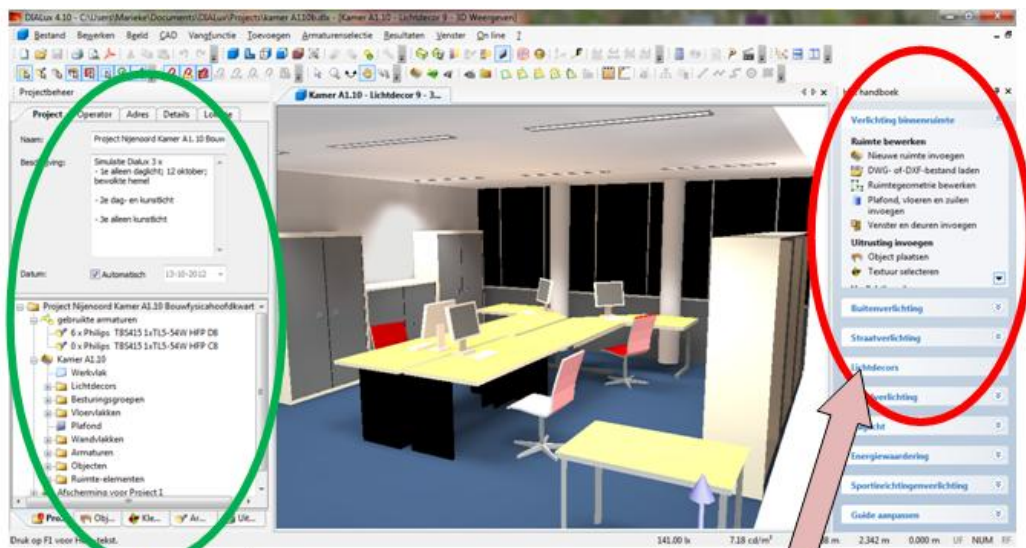
- Rekenprogramma Dialux: <http://www.dialux.com>
- Overzichtelijke site van verlichtingsfabrikant Etap: <http://www.etaplighting.com>
- Verlichtingsfabrikant Osram: <http://www.osram.nl/>
- Tja, en Philips natuurlijk: <http://www.lighting.philips.com/>

Werken met Dialux - simulaties voor daglicht en kunstlicht

1. Download en installeer Dialux van <http://www.dial.de> kies voor de Nederlandse versie.
2. Download en installeer de Philips Product selector http://www.lighting.philips.com/nl_nl/connect/tools_literature/downloads.wpd
Toelichting: Om Philips armaturen en lampen te gebruiken in Dialux: eerst kiezen binnen de Product Selector, en exporteren in Dialux format. Vervolgens in Dialux importeren.

3. Beginnen met Dialux

Start Dialux en klik op "Nieuw Binnenproject". Indeling van het scherm:



2. Linker window: **"Projectbeheer"**

Met tabbladen en invoervelden.

3. Midden: **Grafische weergave**



3D of plattgrond

Ook rendering (na berekening)

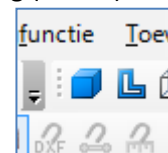
1. Rechter window:

"Handboek"

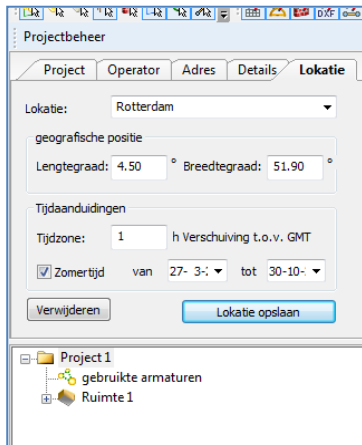
Geeft de werkvolgorde aan. Na aanklikken verschijnt in het linker window het tabblad dat je nodig hebt.

4. Voer de ruimte die je wil doorrekenen in. Dat kan op verschillende manieren.
 - a) Afmetingen in scherm Projectbeheer
 - b) Coördinaten in grafisch scherm en scherm projectbeheer
 - c) Door het inlezen van een DWG-bestand via scherm Handleiding (rechts).

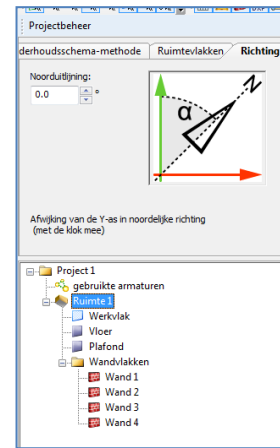
Weergave van de ruimte in 3D of als plattgrond via de werkbalk:



- Klik in het linker menu op **Project** en vul de tabbladen in. Vooral de **lokatie** is belangrijk voor daglichtberekeningen!

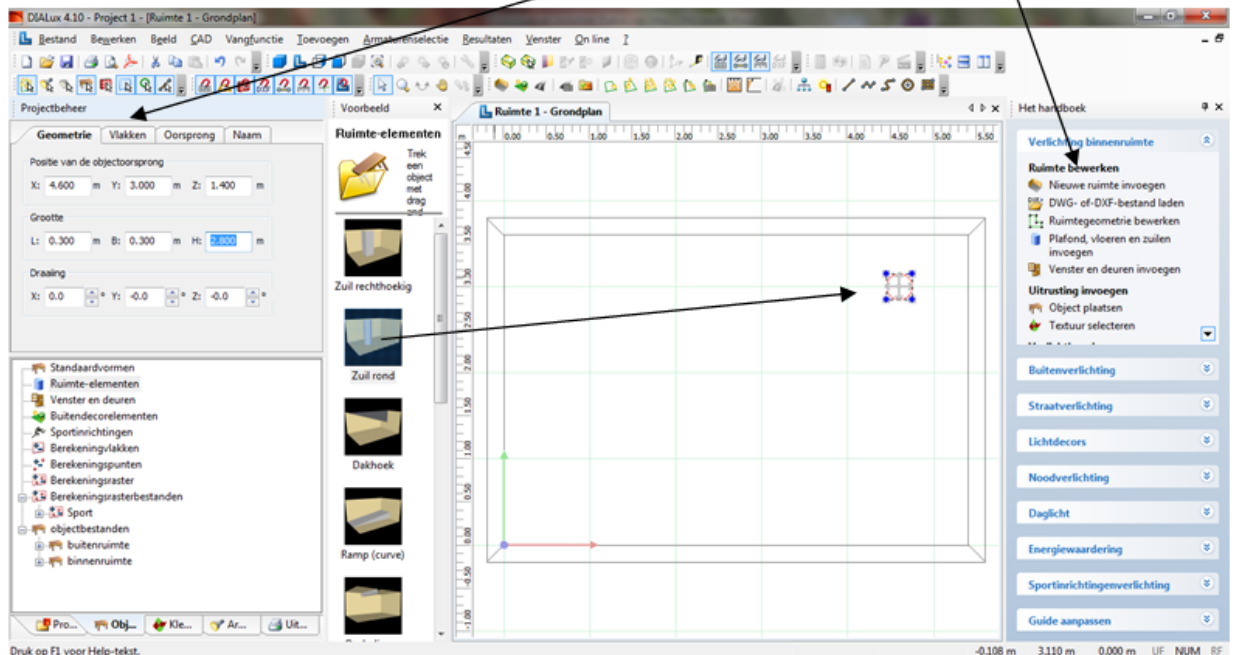


Hoort bij punt 5



Hoort bij punt 6 en 7.

- Klik op **Ruimte 1** en selecteer de vloer, plafond en wanden om ze de juiste kleur te geven. Gebruik hiervoor tabblad **Materiaal**. Dit is erg belangrijk voor de verlichting van de ruimte!
- Klik ook op het tabblad **Richting** om de noordpijl in te stellen (ook voor de daglicht berekeningen)
- Voer ruimte-elementen in. Klik in het Handboek op "**Plafond, vloeren en zuilen invoegen**". Er verschijnt dan links een invoerveld en elementen die naar de tekening gesleept kunnen worden. Afmetingen aanpassen. Met het tabblad "**vlakken**" kunnen kleuren toegekend worden.

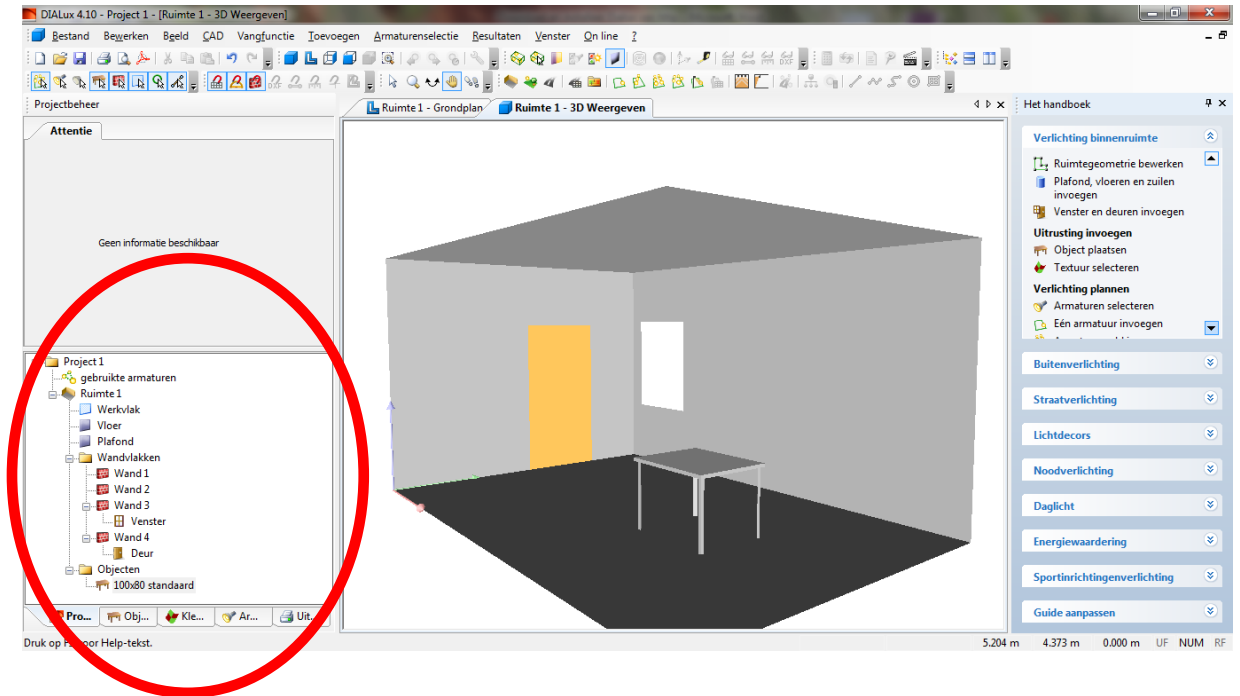


9. Klik vervolgens in de handleiding op **Vensters en deuren invoegen**. Sleep ramen en deuren naar het grafische scherm, en pas in de tabbladen de afmetingen en eigenschappen aan. Gebruik de navigatieknoppen om het resultaat te bewonderen (controleren).



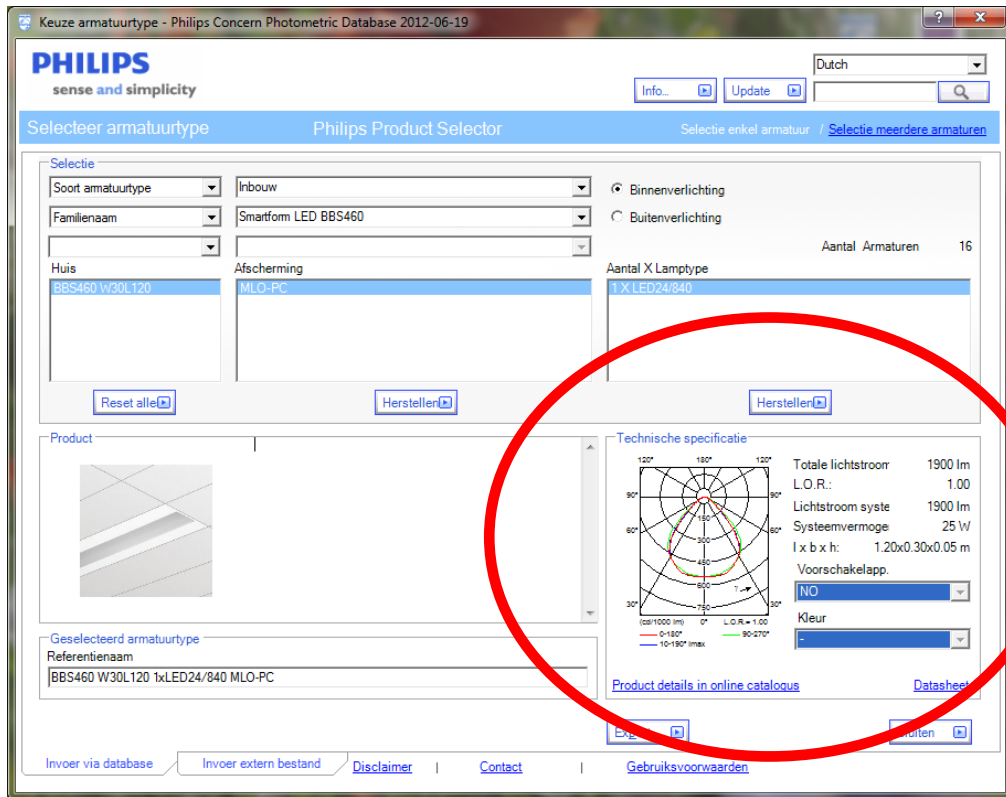
10. Kies **Objecten invoegen**, en vervolgens (linker menu) **binnenruimte** om meubilair in te voegen. De **grotere** objecten (tafel, kasten enz) hebben invloed op de verdeling van het licht in de ruimte. Een donkere kastenwand absorbeert veel licht. Witte meubels reflecteren het licht. Zorg daarom voor de juiste kleur, afmetingen en plaats.

11. Klik op het tabblad **Project** en zie in de menustructuur (links) alles dat je inmiddels hebt ingevoerd. De ruimte is nu klaar om verlichtingsarmaturen in te voeren.



12. Start nu de **Philips Product Selector** (dit is dus een ander programma buiten Dialux). Selecteer de gewenste armaturen en lampen.

Er zijn duizende mogelijkheden, en de Product selector werkt met codes. Het handigste is om eerst in de **Catalogus Binnenverlichting Philips** (hardcopy of pdf) een geschikt armatuur te zoeken. Selecteer het gewenste armatuur en exporteer in Dialux-format.



In de rode cirkel de verlichtingstechnische gegevens:

- Totale **lichtstroom** in lumen
- Het **lichtsterkte** diagram geeft in 2 doorsnedes (haaks op elkaar) de verdeling van de lichtsterkte (cd/sr) weer voor de combinatie van lamptype en armatuur. Hier kan je zien of je te maken hebt met een breedstraler, een dieptestraler of een andere verdeling
- Het systeemvermogen in Watt (energieverbruik). Hieruit volgt het rendement of lichtopbrengst in lumen per Watt

Lichtstroom Φ

Lichtstroom (Φ "lm") is de totale hoeveelheid zichtbaar licht die per seconde door een lichtbron wordt uitgestraald.

Eenheid: lumen (lm)

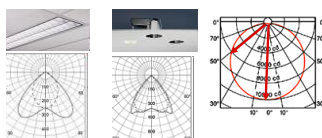
De Lichtstroom is de hoeveelheid stralingsenergie gewogen naar ooggevoeligheid.



Lichtsterkte (lichtintensiteit) I

Een lichtbron die niet naar alle richtingen gelijkmatig straalt, heeft een **lichtintensiteit** die verandert met de richting.

Fabrikanten leveren daarom een lichtsterkediagram



Lichtopbrengst (rendement)

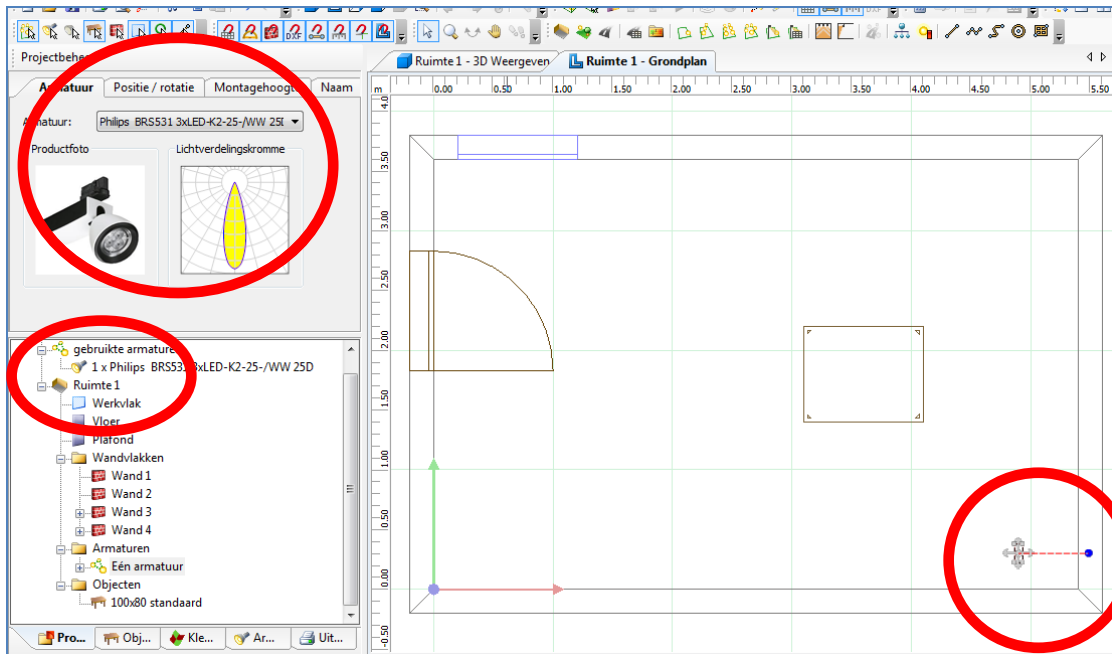


Philips Master LED - 7 Watt
Lichtstroom: 230 lumen
Rendement: 230 lumen/7 W
= 32,8 lumen/Watt



Philips Spaarlamp - 8 Watt
Lichtstroom: 420 lumen
Rendement: 420 lumen/8 W
= 52,5 lumen/Watt

13. Terug naar Dialux. **Importeer** (→ Bestand → Importeren → Armatuurbestanden) het armatuur dat je bij punt 12 hebt aangemaakt. Via het Projectbeheer window kan je nu armaturen naar de plattegrond slepen en/of via de tabbladen de plaatsing ervan vastleggen. Het is ook mogelijk om in één keer een verlichtingslijn of een heel raster van armaturen in te voegen.

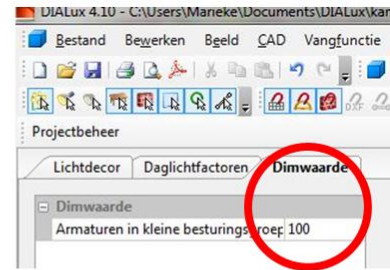
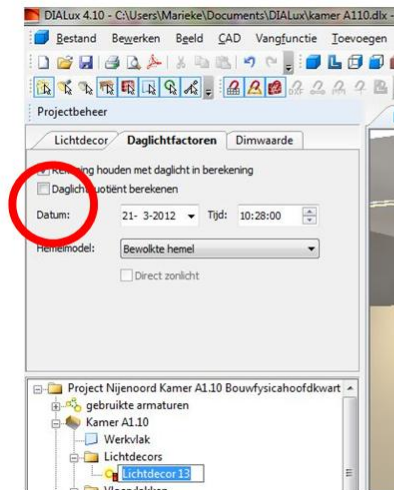


14. Stel een **lichtdecor** in. Klik in het handboek op “**Lichtdecors**”, en kies voor het kunstlicht of daglichtdecor.

Er zijn drie mogelijkheden:

- Alleen kunstlicht:** vertelt je of de gekozen armaturen tot een voldoende hoge verlichtingssterkte leidt, hoe gelijkmatig de ruimte verlicht is, en wat het energieverbruik is. (Kies Kunstlichtdecor)
- Alleen daglicht.** Deze optie biedt ook de mogelijkheid om daglichtfactoren te berekenen. (Kies daglichtdecor)
- De combinatie van dag- en kunstlicht.** Kies hiervoor het Daglichtdecor.
 - Ga naar projectbeheerscherf. Open het lichtdecor.
 - Verwijder het vinkje bij daglichtquotient berekenen.
 - Ga naar tabblad armaturen en stel dimwaarde in op 100% (dat betekent : verlichting aan).

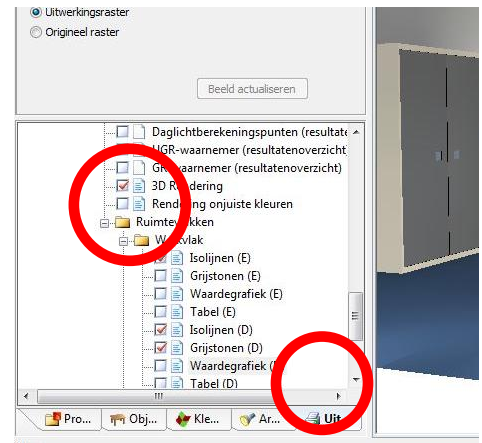




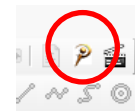
Bij stap 14 lichtdecor. Instellingen voor de combinatie van dag- en kunstlicht.

15. Klik in de werkbalk op **Resultaten** en vervolgens op **Berekening starten!** Afhankelijk van de complexiteit van het ingevoerde model en de rekenkracht van de computer kan dit geruime tijd duren.

16. **Resultaten en uitvoer.** Uitvoer gebeurt door het exporteren van geselecteerde resultaten naar een pdf-bestand (Bestand → Exporteren → Uitwerking in pdf opslaan). Vòòr het exporteren eerst gewenste uitvoer selecteren. Klik in projectbeheer op **tabblad Uitvoer**. In de boomstructuur die bij het project hoort kan nu geselecteerd worden. **Wees erg selectief, want het is mogelijk om vele honderden pagina's met resultaten te produceren!**



<p>Interessant is:</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Gegevensblad armaturen ✓ Armaturen positie-schema ✓ Samenvatting Overzicht van resultaten, ook energie-verbruik ✓ 3D rendering <p>Voor meer uitvoer klik op</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Isolijnen (E) – geeft lijnen van gelijke verlichtingssterkte op het werkvlak ✓ Isolijnen (D) – geeft daglichtfactoren (alleen bij daglichtberekeningen zonder kunstlicht) 	<p>(onder Armatuurtype bijv. Philips)</p> <p>(onder Ruimte 1)</p> <p>(onder lichtdecors)</p> <p>(onder lichtdecors)</p> <p>(onder lichtdecors)</p> <p>ruimtevlakken → en <u>werkvlak</u></p>
--	--



Voor een mooi 3D-rendering: Klik op “Ray-tracer POV-Ray” rechts boven.

Tot slot: Er zijn veel Youtube instructiefilmpjes over Dialux, en er zijn ook (engelse) Dialux forums.