Licht, basisbegrippen (verdieping)

Kennisbank Bouwfysica
Auteur: ir. A.C. van der Linden

1 Temperatuurstralers

De sterkte van de elektromagnetische straling die door een lichaam met een zekere temperatuur wordt uitgezonden, wordt weergegeven in de vorm van een energiestroomdichtheid per eenheid van golflengte (W/m^2.µm). De hoeveelheid straling gesommeerd over het gehele spectrum kan worden bepaald met de "wet van Stefan Boltzman".

$$q_s = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \; [W/m^2]$$

In deze fomule is:

q_s	totaal uitgezonden energiestroom in W/m^2
ε	emissiecoëfficiënt
σ	constante van Stefan Boltzman: 56,7.10^{-9} W/m^2.K^4
T	absolute temperatuur van het oppervlak in K

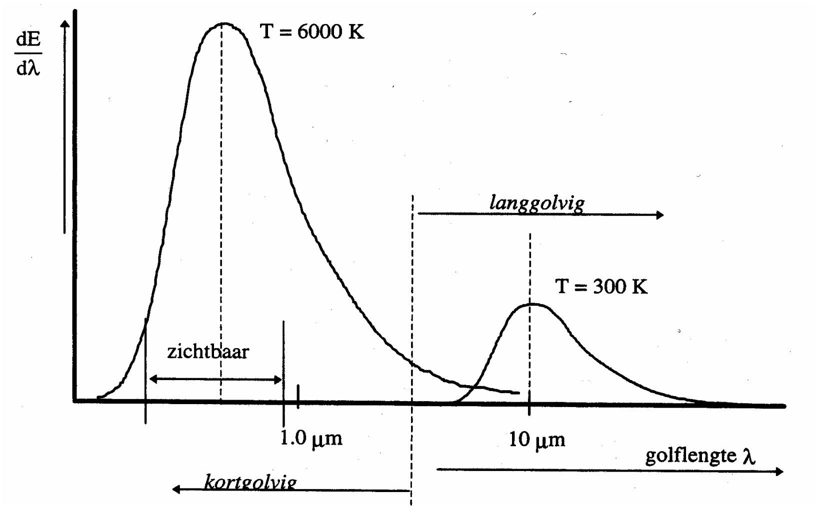
De emissiecoëfficiënt ε is over het algemeen afhankelijk van de golflengte en de temperatuur. Een oppervlak dat de maximale straling uitzendt die bij een bepaalde temperatuur hoort, wordt een "zwarte straler" genoemd. De emissiecoëfficiënt is dan $\varepsilon = 1$.

Met de "wet van Wien" kan worden bepaald bij welke golflengte het maximum van de straling ligt (zie ook figuur 1).

$$\lambda_{max} \cdot T = 2{,}898.10^{-3} \; [mK]$$

In deze fomule is:

λ_{max}	golflengte waarbij de stralingssterkte het grootst is, in m
T	absolute temperatuur van het oppervlak in K



figuur 1. de golflengte waarbij de stralingssterkte maximaal is, wordt bepaald door de temperatuur van het oppervlak

2 Verlichtingsgrootheden

De grootheden waarin licht wordt gemeten, zijn oorspronkelijk vastgelegd op basis van een visuele helderheidsvergelijking, waarbij men licht liet vallen op een referentievlak. De verlichtingssterkte van een bekende lichtbron werd gevarieerd (door verandering van de afstand of door filteren) totdat dezelfde helderheidsindruk ontstond als bij de te meten lichtbron. Hierbij werd als standaard lichtbron onder andere een kaars van bepaalde grootte en samenstelling gebruikt. De standaard kaars, bezien als puntbron met een lichtsterkte van 1 candela verlichtte een vlak op één meter afstand met een verlichtingssterkte van 1 lux.
Later zijn de verlichtingsgrootheden afgeleid uit de energiestroom die het licht (de elektromagnetische straling) vertegenwoordigt. Dat betekent dat de lichtstroom, uitgedrukt in lumen, nu het uitgangspunt is. De lichtsterkte (cd) en de verlichtingssterkte (lux) worden hieruit afgeleid.

2.1 Lichtstroom

Onder de lichtstroom verstaat men dat deel van de totale uitgestraalde elektromagnetische straling dat een menselijk oog als licht ervaart. In formulevorm uitgedrukt, ziet dit er als volgt uit:

$$\phi = 683 \cdot \int_{0,38\,\mu m}^{0,78\,\mu m} V(\lambda) \cdot \left[dP / d\lambda \right] \cdot d\lambda \; [lumen]$$

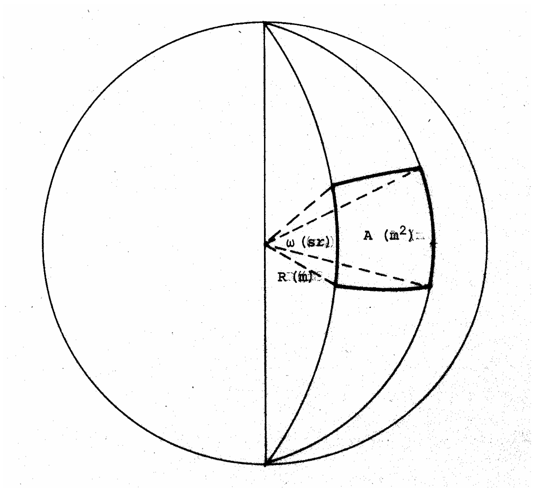
In deze formule is:

ϕ	lichtstroom in lumen
$V(\lambda)$	spectrale ooggevoeligheid
dP	uitgezonden straling in watt per golflengtegebiedje $d\lambda$

Bij λ = 0,555 μm is $V(\lambda) = 1$; per definitie geldt daarbij dat 1 watt uitgestraald vermogen 683 lumen oplevert (het fotometrisch stralingsequivalent).

2.2 Lichtsterkte

Het verband tussen lichtsterkte en lichtstroom is als volgt gedefinieerd: "De lichtsterkte (in candela) is de lichtstroom (in lumen) die per eenheid van ruimtehoek (steradiaal) in een bepaalde richting wordt uitgezonden".
Een ruimtehoek is gedefinieerd als het deel dat uit een boloppervlak wordt gesneden (A) gedeeld door de afstand in het kwadraat (R^2) (zie figuur 2).



figuur 2. de definitie van de ruimtehoek

$$\omega = A / R^2 \left[sr \right]$$

In deze formule is:

ω	ruimtehoek in steradialen (sr)
A	oppervlak dat wordt uitgesneden in m^2
R	afstand in m

De ruimtehoek is niet afhankelijk van de vorm van de uitsnijding die op het boloppervlak wordt gemaakt. Aangezien het oppervlak van een bol gelijk is aan $4\pi R^2$ is een ruimtehoek die de gehele ruimte beslaat gelijk aan 4π steradialen. 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. Echter, in de praktijk hebben alle lichtbronnen eindige afmetingen. Dit vormt 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.
Het verband tussen lichtsterkte en lichtstroom kan vanzelfsprekend ook anders worden geschreven:

De lumen is de lichtstroom die door een lichtbron met een sterkte van één candela wordt uitgestraald in een ruimtehoek van één steradiaal.

De totale door een lichtbron uitgezonden lichtstroom wordt bepaald volgens:

$$\phi = \int I_{\omega} \cdot d\omega \left[lumen \right]$$

In deze formule is:

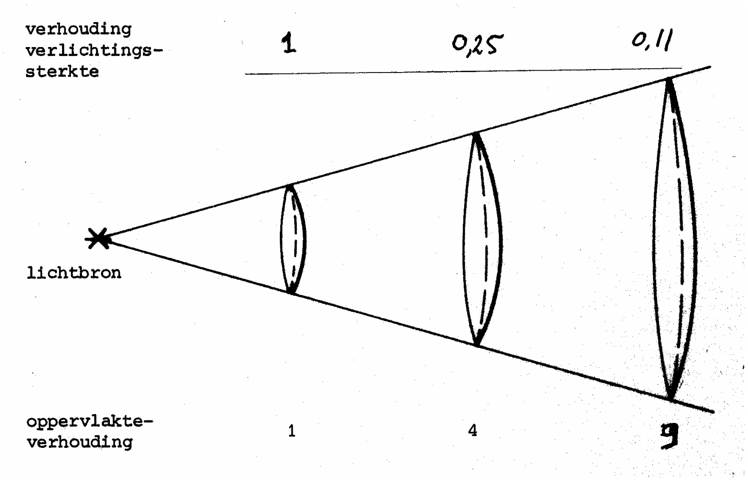
ϕ	lichtstroom in [lumen]
I_ω	lichtsterkte in [cd] in een specifieke richting
ω	ruimtehoek waarin het licht wordt uitgestraald in [sr]

Is bij een lichtbron de lichtsterkte in alle richtingen bekend dan moet om de totale uitgezonden lichtstroom te bepalen de integratie worden uitgevoerd over 4π steradialen. Als de lichtsterkte (I) in alle richtingen even groot is, volgt voor de lichtstroom $\phi = 4\pi.I$ (lumen).

2.3 Verlichtingssterkte E

De verlichtingssterkte E is de opgevangen lichtstroom per eenheid van oppervlakte A. De eenheid is daarmee lumen/m^2, maar deze heeft een eigen naam "lux" gekregen.

De verlichtingssterkte zal over het algemeen - als de afstand tot de lichtbron groot genoeg is om hem als een puntbron te beschouwen - afnemen met het kwadraat van de afstand (zie figuur 3).



figuur 3. de verlichtingssterkte neemt kwadratisch af met de afstand tot de (punt)bron

Op een meter afstand is het oppervlak dat door een ruimtehoek van 1 sr uit een denkbeeldig boloppervlak wordt uitgesneden 1 m^2 groot. Bij een lichtsterkte van 1 cd (= 1 lm/sr) is dan de verlichtingssterkte op dit punt 1 m/ m^2 ofwel 1 lux. Op een afstand van twee meter snijdt dezelfde ruimtehoek een viermaal zo groot oppervlak uit. De verlichtingssterkte is dan nog slechts 0,25 lux omdat dezelfde lichtstroom nu door een viermaal zo groot oppervlak gaat.

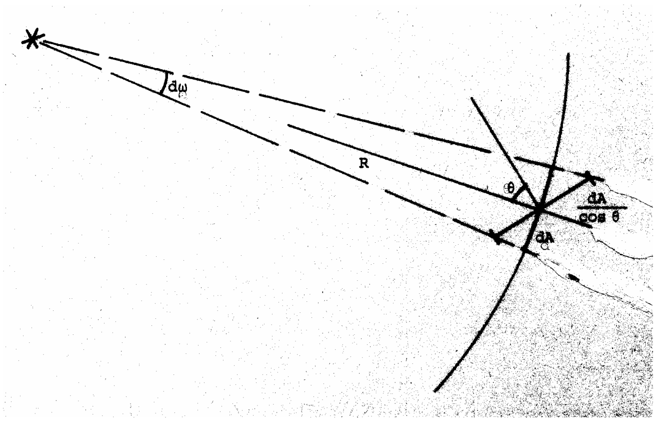
Op een afstand R van een lichtbron bedraagt de verlichtingssterkte:

$$E = I / R^2 \; [lux]$$

Hierin is:

E	verlichtingssterkte in lux (lumen/m^2)
I	lichtsterkte in de betreffende richting
R	afstand tot de (puntvormige) lichtbron in m

Indien een vlak niet loodrecht op de lichtstroom staat, geldt het volgende (zie figuur 4). Op een afstand R van de lichtbron is de verlichtingssterkte op het oppervlakte-elementje dA gelijk aan E = I/R^2 lux. Echter, omdat de lichtstroom niet op het oppervlakte-elementje dA valt maar op het grotere elementje dA/cos is de verlichtingssterkte evenredig lager.



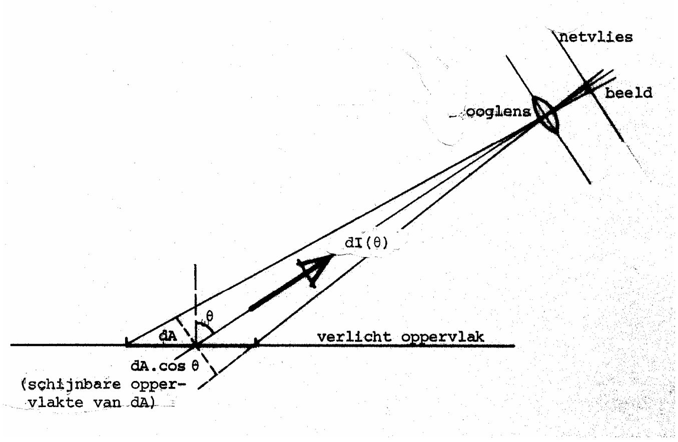
figuur 4. als de lichtstroom onder een hoek op het oppervlak invalt, wordt de verlichtingssterkte lager.

$$E = I \cdot \cos\alpha / R^2 \; [lux]$$

Het zal duidelijk zijn dat een oppervlak van enige uitgestrektheid - dat verlicht wordt door een puntvormige lichtbron van punt tot punt - een andere verlichtingssterkte zal hebben omdat zowel de afstand tot de lichtbron als de hoek waaronder deze gezien wordt, steeds veranderen.
Overigens zegt de verlichtingssterkte niets over de helderheid waarmee een bepaald oppervlak wordt waargenomen. Daarvoor is de mate waarin en de wijze waarop het oppervlak licht reflecteert maatgevend.

2.4 Luminantie en helderheid

De helderheid waarmee een bepaald vlak wordt waargenomen, is een subjectief begrip, bepaald door de fysiologische en psychologische omstandigheden van de waarnemer.
Om iets over helderheidsverhoudingen te kunnen zeggen, is de natuurkundige grootheid "Luminantie" (L) ingevoerd (zie ook figuur 5)



figuur 5. grootheden voor het bepalen van de luminantie

De luminantie kan worden beschouwd als de lichtsterkte in een bepaalde richting per eenheid van oppervlakte van een lichtbron of verlicht vlak. In formulevorm ziet de luminantie er als volgt uit:

$$L(\theta) = dI(\theta) / dA \cdot \cos\theta \left[cd/m^2 \right]$$

Hierbij is $dI(\theta)$ de lichtsterkte zoals die door een oppervlakte-elementje dA wordt uitgestraald in de richting θ. Op het netvlies van het oog wordt een beeldje gevormd waarvan de oppervlakte niet alleen evenredig is met de afstand tot het verlichte oppervlak maar ook vooral met de "schijnbare" oppervlakte van het elementje dA ($dA_{schijnbaar} = dA.\cos\theta$).

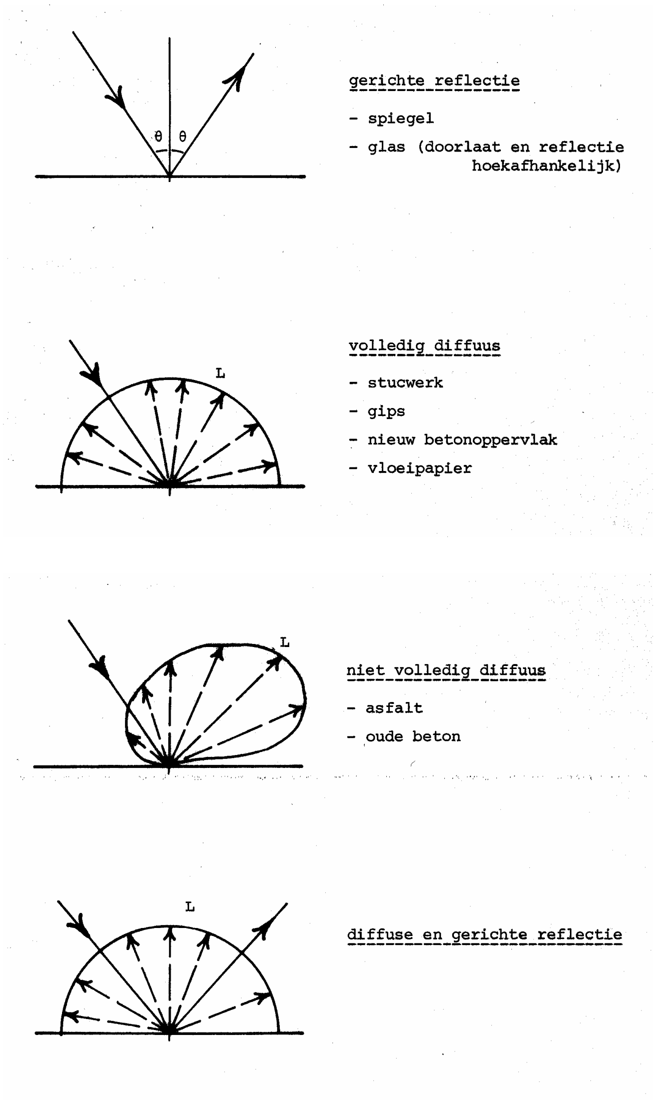
De lichtstroom die het beeldje op het netvlies vormt, is evenredig met de uitgezonden verlichtingssterkte en de afstand van het oog tot het oppervlakte-elementje dA. Het aantal lumen dat per m^2 netvlies wordt ontvangen, is onafhankelijk van de grootte van het oppervlakte-elementje dA en van de afstand hiervan tot het oog. Immers, als de grootte van het oppervlakte-elementje wordt gehalveerd, wordt de uitgestraalde lichtsterkte, dus de uitgezonden lichtstroom in lumen per steradiaal tweemaal zo klein, evenals het beeldje op het netvlies, waardoor het aantal lumen dat per m^2 netvlies wordt ontvangen, gelijk blijft. Als de afstand tussen oog en oppervlakte-elementje wordt verdubbeld, wordt de verlichtingssterkte ten gevolge van het door het oppervlakte-elementje uitgezonden licht ter plaatse van het oog viermaal zo klein. Omdat ook het beeldje op het netvlies viermaal zo klein wordt, blijft de opgevangen lichtstroom (in lumen) per m^2 netvlies ook weer hetzelfde.
Bij een diffuus stralend of reflecterend vlak is de luminantie in alle richtingen gelijk. Bij grotere hoeken wordt de lichtsterkte weliswaar kleiner, maar de schijnbare oppervlakte wordt evenredig kleiner, zodat de luminantie gelijk blijft.

Voor het subjectieve begrip helderheid geldt een en ander praktisch genomen evenzeer. Vaak worden de begrippen helderheid en luminantie verward. Echter, als men over meetbare grootheden praat, dient men altijd de luminantie te gebruiken.

3 Het verlichte oppervlak

3.1 Diffuus reflecterende of stralende oppervlakken

Een oppervlak straalt "diffuus" licht af als de luminantie in ieder punt van het oppervlak in alle richtingen gelijk is. Een oppervlak kan licht uitzenden door verhitting (gloeiende staalplaat), door doorlating (opaalkap van een verlichtingsornament) of door reflectie van opvallend licht. Ingeval van reflectie moet het oppervlak ongeacht de invalsrichting van het opvallend licht diffuus licht afstralen. Hieraan voldoen bij benadering stucwerk, gips, nieuwe beton en dergelijke, in tegenstelling tot een spiegel waarbij invallend licht onder dezelfde hoek weer uittreedt; mengvormen zijn ook mogelijk (zie figuur 6).



figuur 6. verschillende wijzen van reflectie

De lichtsterkte die een diffuus stralend oppervlak uitzendt, is maximaal in de richting loodrecht op dit oppervlak. Wanneer de lichtsterkte in een bepaalde richting wordt bekeken, krijgt men weer te maken met de schijnbare oppervlakte.

$$I(\theta) = L \cdot A_{schijnbaar} = L \cdot A \cdot \cos\theta = I_0 \cdot \cos\theta \, [cd]$$

Hierin is:

I	lichtsterkte in de richting θ in cd
I_0	lichtsterkte in cd loodrecht op het vlak
L	luminantie van het oppervlak in alle richtingen
A	oppervlakte in m^2
θ	hoek ten opzichte van de normaal op het vlak

Voor de door een plat vlak (over een halve bol) afgestraalde totale lichtstroom vindt men:

$$\phi = \int_{h.b.} \int_{A} L \cdot \cos\theta \cdot d\omega \cdot dA = \int_{h.b.} L \cdot A \cdot \cos\theta \cdot d = \pi \cdot L \cdot A \, [lumen]$$

Hierin staat:

h.b.	voor “halve bol”
dω	voor een ruimtehoek-elementje binnen die halve bol
	overige grootheden, zie voorgaande formule

3.2 Reflectiecoëfficiënt

De reflectiecoëfficiënt van een oppervlak is gedefinieerd als:

$$r = d\phi_{gereflecteerd} \,/\, d\phi_{opvallend}$$

Wanneer de reflectiecoëfficiënt (r) van een bepaald diffuus reflecterend oppervlak bekend is, volgt voor de luminantie:

$$L = \phi / (\pi \cdot A) = r \cdot E / \pi \, \left[cd / m^2 \right]$$

Hierin is:

ϕ	opvallende lichtstroom in lumen
A	oppervlakte in m^2
r	reflectiecoëfficiënt
E	verlichtingssterkte in lux (lumen/m^2)

De laatste formule illustreert duidelijk dat luminantie en verlichtingssterkte geheel verschillende grootheden zijn. De verlichtingssterkte wordt, zoals eerder uiteengezet, bepaald door het opvallend licht; het vlak waarop dit licht valt, oefent hierop geen enkele invloed uit. De luminantie van een vlak - dat wat wij waarnemen - is enerzijds natuurlijk ook afhankelijk van de verlichtingssterkte van het vlak maar anderzijds vooral van de eigenschappen van het vlak, zoals de reflectiecoëfficiënt. Verschillende vlakken hebben bij een zelfde verlichtingssterkte een verschillende luminantie. In tabel 1 is voor een aantal materialen de reflectiecoëfficiënt gegeven.
Overigens hoeft de reflectiecoëfficiënt vanzelfsprekend niet voor alle golflengten gelijk te zijn. Is dit wel zo, dan zal bij opvallend wit licht het vlak bij steeds lager wordende reflectiecoëfficiënt steeds grijzer worden tot zwart toe bij r = 0. Reflecteert het vlak alleen licht van een bepaalde golflengte dan zal het vlak bij wit opvallend licht de bij die golflengte horende "kleur" hebben. Bij rood licht vallend op een groen vlak zal dit vlak zwart lijken (r = 0) voor de golflengte behorend bij rood licht.

reflectiefactoren diverse materialen

materiaal	refl. factor
wit pleisterwerk (nieuw)	0.70 – 0.80
wit pleisterwerk (oud)	0.30 – 0.60
beton (nieuw)	0.40 – 0.50
beton (oud)	0.05 – 0.15
baksteen (nieuw)	0.10 – 0.30
baksteen (oud)	0.05 – 0.15
aluminium (hoogglanzend)	0.80 – 0.85
aluminium (mat)	0.50 – 0.60
donkere houtsoorten	0.10 – 0.30
lichte houtsoorten	0.30 – 0.50
schrijfpapier	0.70 – 0.80

reflectietiefactoren kleuren

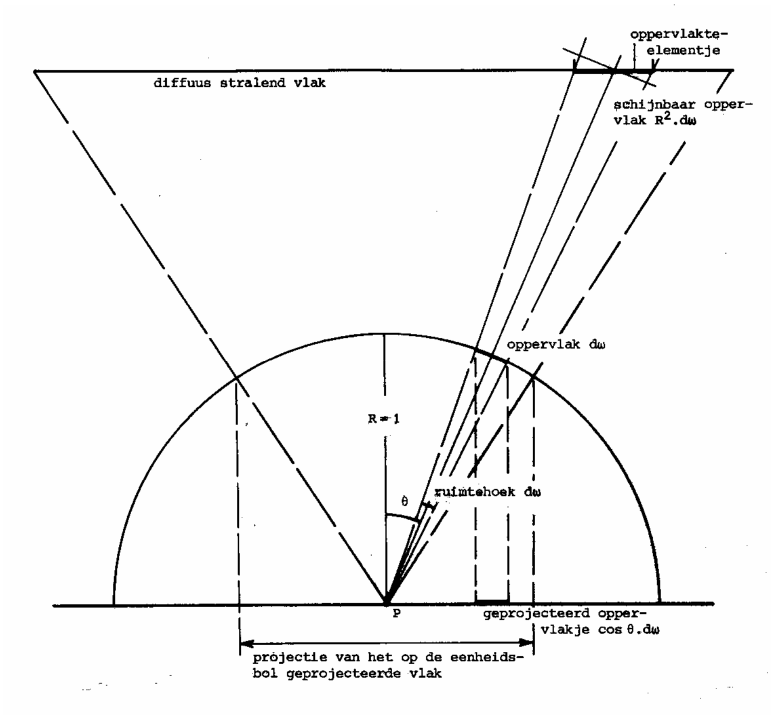
kleur	reflectie factoren		
	licht	middel	donker
wit	0.80	0.70	-
grijs	0.60	0.35	0.20
zwart	-	-	<0.04
geel	0.70	0.50	0.30
beige	0.65	0.45	0.25
bruin	0.40	0.20	0.07
rood	0.35	0.20	0.10
groen	0.50	0.25	0.12
blauw	0.55	0.25	0.08

tabel 1. reflectiecoëfficiënten van verschillende materialen en bij verschillende kleuren

4 Algemene verlichtingsformule

Wanneer lichtbronnen zodanig grote afmetingen hebben dat ze niet meer als puntbron kunnen worden beschouwd, kan men ze voor het berekenen van de verlichtingssterkte in een punt P projecteren op een rond dit punt geslagen eenheidsbol (straal R = 1 m) (zie figuur 7). Of een lichtbron nog als puntbron mag worden beschouwd, hangt af van de nauwkeurigheid die men nastreeft. Deze hangt af van de verhouding tussen de grootste afmeting van de lichtbron (a) en de afstand van het verlichte vlak tot de lichtbron (R). De fout die men maakt is:

Bij:
a = 0,1 . R = ca 0,5%
a = 0,2 . R = ca 1 %
a = 0,5 . R = ca 5 %



figuur 7. projectie van lichtbronnen op de “eenheidsbol” en op het grondvlak daarvan

Zolang het diffuus stralende lichtbronnen of diffuus reflecterende vlakken betreft, doet de hoek waaronder het vlak wordt gezien niet ter zake. Immers, de luminantie is in alle richtingen even groot bij diffuus stralende vlakken. Stelt men zich nu het vlak voor verdeeld in zodanige oppervlakte-elementjes dat deze een ruimtehoek dω beslaan dan is de schijnbare oppervlakte van zo'n elementje R^2.dω (zie de definitie van de ruimtehoek). De lichtsterkte die wordt uitgestraald in de richting van P bedraagt dan:

$$dI = L \cdot R^2 \cdot d\omega [cd]$$

Hierin is:

dI	lichtsterkte uitgestraald in de richting van P
R^2dω	schijnbare oppervlakte van een elementje van het diffuus stralende vlak

In het punt P kan men het oppervlakte-elementje beschouwen als een puntbron die in de richting van P een lichtsterkte dI uitstraalt. De bijdrage in de verlichtingssterkte in punt P hiervan is:

$$dE = \frac{dI \cdot \cos\theta}{R^2} [lux]$$

Ofwel:

$$dE = \frac{L \cdot R \cdot d\omega \cdot \cos\theta}{R^2} = L \cdot d\omega \cdot \cos\theta [lux]$$

Men kan ook het oppervlakte-elementje projecteren op de eenheidsbol rond P. Omdat de ruimtehoek dezelfde blijft, kan men voor dit geprojecteerde vlakje dezelfde luminantie aanhouden bij een schijnbare oppervlakte d (immers, de afstand is R = 1 m), zodat

$$dI = L \cdot d\omega [cd]$$

Bij een afstand R = 1 m is de bijdrage aan de verlichtingssterkte in P nu:

$$dE = dI \cdot \cos\theta [lux]$$

Ofwel:

$$dE = L \cdot d\omega \cdot \cos\theta [lux]$$

Precies hetzelfde resultaat als boven.

De totale verlichtingssterkte in P vindt men door de bijdrage van alle oppervlakte-elementjes te sommeren:

$$E = \oint_{h.b.} L \cdot \cos\theta \cdot d\omega [lux]$$

In figuur 7 kan men verder zien, dat cos dω de projectie is op het platte vlak van het vlakje dat de ruimte hoek dω uitsnijdt uit de eenheidsbol. Men kan cos θ.dω de geprojecteerde ruimtehoek noemen ($d\omega_{proj}$), zodat:

$$E = \oint_{h.b.} L \cdot d\omega_{proj} [lux]$$

en bij een gelijkmatig verdeelde luminantie:

$$E = L \cdot \oint_{h.b.} d\omega_{proj} [lux]$$

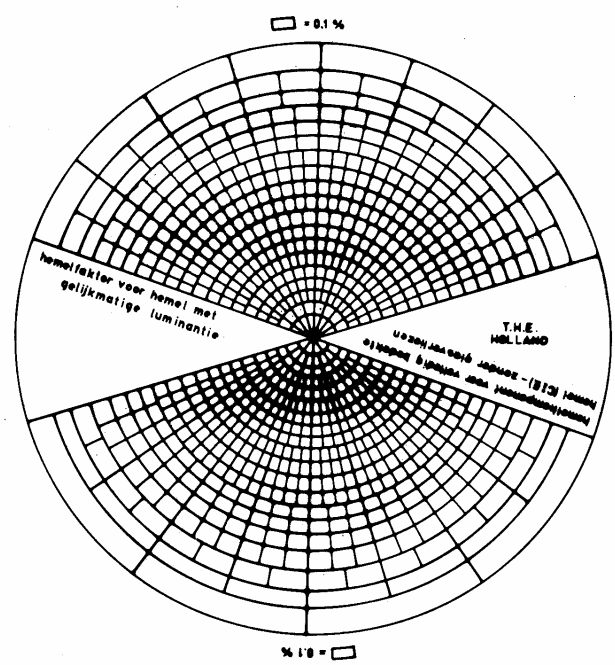
De verlichtingssterkte in een bepaald punt ten gevolge van een diffuus stralend vlak vindt men dus door dit vlak te projecteren op een rond dit punt geslagen eenheidsbol en vervolgens deze projectie op het boloppervlak weer te projecteren op het grondvlak van de halve eenheidsbol. De oppervlakte van deze projectie vermenigvuldigd met de oorspronkelijke luminantie is de verlichtingssterkte.
Voor de verlichtingssterkte buiten onder een egale hemel met luminantie L vindt men zo:

$$E = L \cdot \oint_{h.b.} d\omega_{proj} = \pi \cdot L [lux]$$

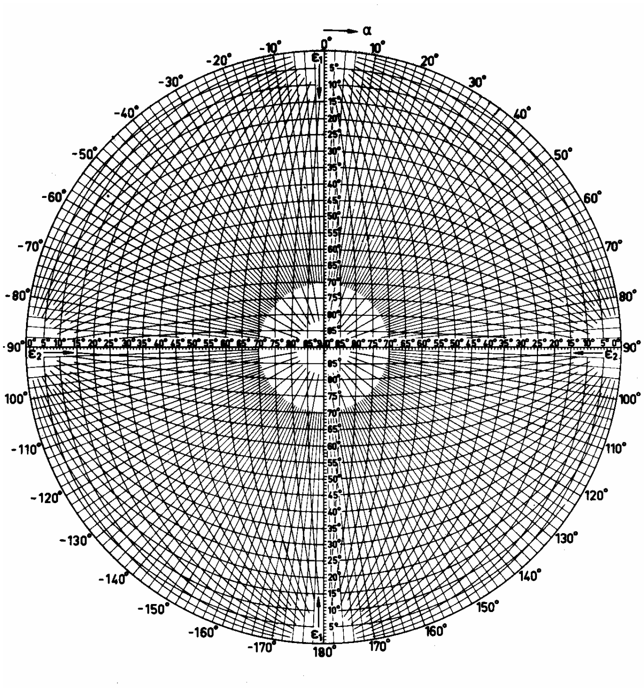
Immers de projecties van alle oppervlakte-elementjes vullen het gehele grondvlak van de halve eenheidsbol en dat is π m^2 groot.

Voor gevallen waarbij de lichtbron willekeurige, eindige afmetingen heeft, is de oplossing minder eenvoudig, maar daarvoor bestaat een aantal goede en gebruiksvriendelijke computerprogramma's, die in de praktijk veelvuldig worden gebruikt.

Het is ook mogelijk om gebruik te maken van een grafische methode om over een enkele situatie snel iets te kunnen zeggen, bij voorbeeld de in het dictaat "Algemene Verlichtingskunde" van de Technische Hogeschool te Eindhoven gegeven methode. Het oppervlak van de eenheidsbol wordt hierbij verdeeld in 1000 vlakjes die - uitgaande van een volledig gelijkmatige verdeling van de luminantie - elk een even grote bijdrage aan de verlichtingssterkte geven. Uiteraard zullen deze vlakjes steeds groter worden naarmate ze lager op de bol liggen. Bij gelijke grootte van de vlakjes zou de in de richting van P uitgezonden lichtsterkte steeds even groot zijn, maar doordat de hoek waaronder het licht invalt steeds meer gaat afwijken van de normaal op het grondvlak, zou de bijdrage aan de verlichtingssterkte steeds minder worden naarmate ze lager op de bol liggen. De projectie van de aldus gevormde vlakjes levert het diagram op dat is gegeven in figuur 8. Met behulp van een tweede diagram ("radiaaldiagram", figuur 9), kan men de projectie van de te beschouwen lichtbronnen intekenen op het grondvlak van de eenheidsbol. Hoe dit precies in zijn werk gaat, wordt besproken bij dagverlichting. Voor het bepalen van de daglichtfactor vormen diagrammen nog altijd een prima methode om een bepaalde situatie te beoordelen. Voor dagverlichting wordt ook gebruik gemaakt van andere dan egale luminantieverdelingen. Het diagram in figuur 8 geeft ook de situatie weer voor een verdeling (C.I.E.) waarbij de luminantie loodrecht boven het beschouwde vlak driemaal zo hoog is als die evenwijdig aan het vlak (de horizon). De bijdrage van de onderste delen van de "eenheidsbol" wordt in die situatie duidelijk minder, die van de hogere delen meer (zie ook het diagram).



figuur 8. diagram ter bepaling bijdrage aan de verlichtingssterkte van oppervlakte-elementjes van de "eenheidsbol"



figuur 9. radiaaldiagram voor het intekenen van de projectie van lichtbronnen op de “eenheidsbol”