Begrippen en eenheden

Instituut voor Perceptie Onderzoek
Postbus 513, 5600 MB Eindhoven

JAJR/mb 91/25
02.04.1991

<u>Rapport no.</u> 793

<u>Begrippen en eenheden</u>

J.A.J. Roufs

JR/mb

BEGRIPPEN EN EENHEDEN

Prof. dr. ir. J.A.J. Roufs
Instituut voor Perceptie Onderzoek
Postbus 513
5600 MB Eindhoven

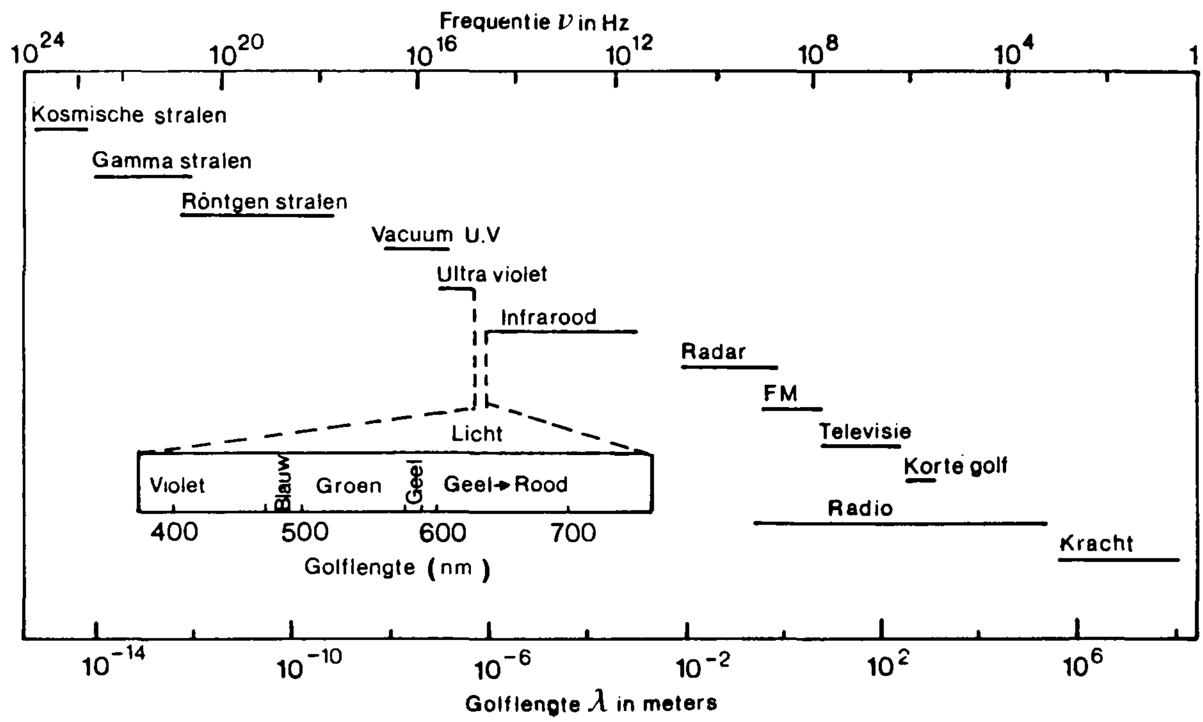
Basisbegrippen en rekeneenheden, nodig voor het uitbrengen van een goed onderbouwd ergonomisch advies.

Oorspronkelijk leefde en werkte de mens overwegend buiten. Maar die natuurlijke buiten omgeving maakte gaandeweg plaats voor een beschutte woon- en werkplek. Ergonomie omvat de aanpassing van de kunstmatige omgeving aan de mogelijkheden en beperkingen van de mens. Hij past zich immers niet meer aan de natuurlijke cyclus van dag en nacht en de seizoenen aan, maar zet met technische hulpmiddelen de leefomgeving naar zijn hand.

Sinds de mens niet meer 'met de kippen op stok' gaat , speelt licht een wezenlijke rol. Dankzij licht kan de moderne mens overleven. De eigenschappen van licht en de uitwerking daarvan op voorwerpen in de omgeving maken waarneming van helderheids- en kleurcontrasten mogelijk. De licht-reflectie en licht-absorbtie van objecten is uiterst belangrijk. Daardoor kan de mens zich oriënteren en bedreigingen omzeilen, gevaarlijke obstakels vermijden en vriend en vijand onderscheiden. Bovendien - en dat wordt almaar belangrijker - kunnen we er informatie door in ons opnemen.

LICHT

Licht is een 'golfverschijnsel'. Het maakt als zodanig deel uit van het gehele veld van electromagnetische straling: Kosmische stralen - gammastralen - röntgenstralen - vacuum ultra-violet - infra-rood - radar - TV - FM - radio (afb.1). In deze reeks van straling met hoge energie en zeer korte golflengte tot lage energie en lange golflengte, neemt het licht tussen ultra-violet en infra-rood een heel kleine plaats in. Alleen de zichtbare straling tussen ruwweg 400 en 700 nm (4 tot 7 $\cdot 10^{-7}$ m) is in staat bij de mens een sensatie van licht teweeg te brengen. 'Infrarood licht' en 'ultra-violet licht' zijn dan ook voorbeelden van onjuist taalgebruik.



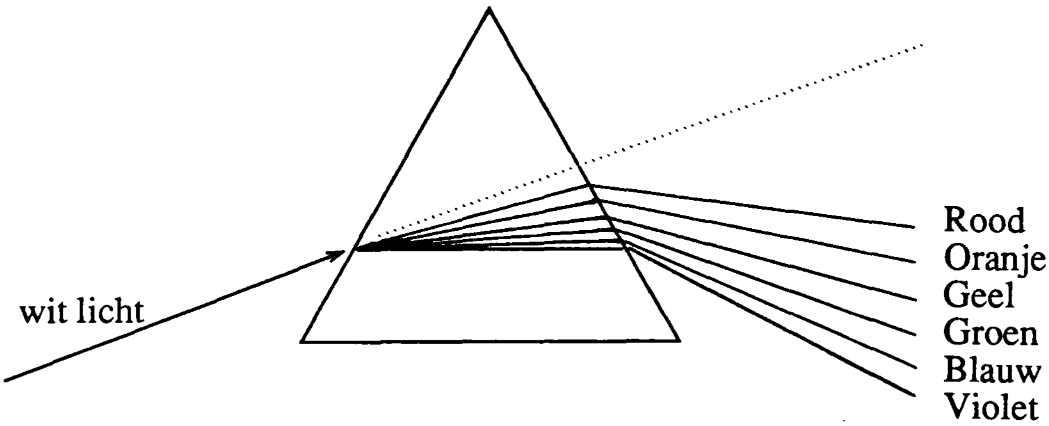
Afbeelding 1

Lichtgolven planten zich, wat betreft de condities relevant voor deze cursus, in alle richtingen rechtlijnig voort. De golflengte (λ) is de duur van één periode (T) maal de voortplantingssnelheid (c): $\lambda = c \cdot T$. Met de karakterisering van licht door deze fysische grootheid neemt men tegenwoordig eigenlijk geen genoegen meer; lichtgolven kennen in elk medium (water, lucht e.d.) immers een eigen karakteristieke voortplantingssnelheid die ook nog afhankelijk is van de fysische parameters zoals de temperatuur. Daarom wordt in streng wetenschappelijk verband de reciproke van de periode, de frequentie $f = 1/T$, gebruikt. Voor dagelijkse verlichtingsberekeningen is de golflengte echter nog goed bruikbaar.

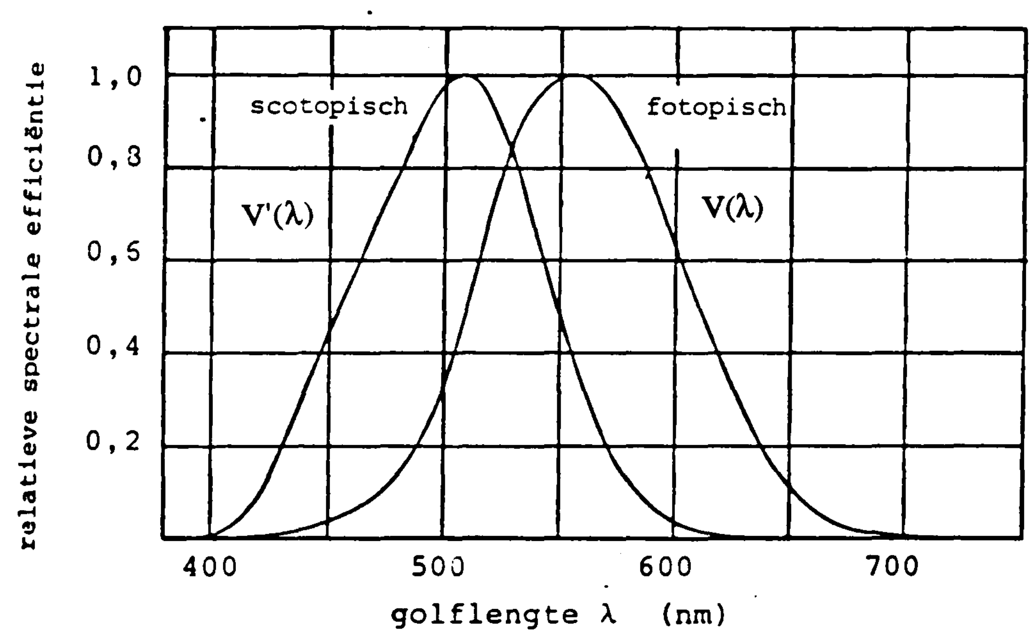
In het oog vindt door weging een selectie van de totale electromagnetische straling plaats. Newton toonde met behulp van een prisma aan dat door ons als wit waargenomen licht feitelijk is opgebouwd uit kleuren met een toenemende golflengte van blauw naar rood (afb.2).

De gevoeligheid van het oog voor licht van verschillende golflengte wordt sinds 1924 gekarakteriseerd door de weegfactor V (voor visibility). V(λ) geldt voor het fotopisch systeem, de kleurgevoelige 'dagzin'. Daartoe beperkt zich deze cursus.

De scotopische weegfactor V'(λ) voor de 'nachtzin' - het oog is dan volledig kleurenblind; 'In het donker zijn alle katjes grijs' - blijft hier buiten beschouwing (afb.3).



Afbeelding 2.

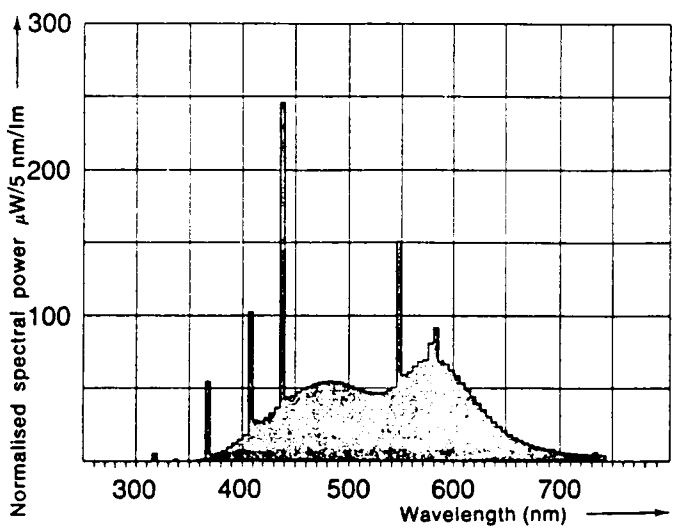


Afbeelding 3.

Alle symbolen die bij het rekenen met licht voorkomen, liggen internationaal ondubbelzinnig vast. Sinds eind vorige eeuw zijn vooral de Commission Internationale de l'Eclairage en het Conférence Générale des Poids et Mesures belast met het beheer van de standaarden en eenheden die met deze symbolen worden aangeduid. Daarnaast is ook de International Standard Organisation (ISO) betrokken bij lichteenheden en standaards.

LICHTSTROOM

Licht is belangrijk in het leven. Kunstlicht heeft de blik van de mens enorm verruimd. Kunstlicht werd in economische zin een begeerlijk goed: het heeft dus een waarde. Voor licht wordt per tijdseenheid betaald. Om het verbruik te kunnen meten, moet licht dus in kwantiteiten uitgedrukt kunnen worden. Daartoe is de licht-flux of lichtstroom (Φ) als grootheid gedefinieerd. Φ wordt uitgedrukt in lumen (lm). De lichtstroom Φ is een hoeveelheid licht die zich per tijdseenheid in de ruimte voortplant. Het verband met het hieraan ten grondslag liggende stralingsvermogen van het EM-veld, de stralingsstroom, kan met behulp van $V(\lambda)$ worden gelegd.



Afbeelding 4. Opbouw van het totaal uitgestraalde vermogen P van een lichtbron als som van de uitgestraalde hoeveelheden per golflengte.

De relatie tussen lichtstroom Φ_v en stralingsstroom Φ_e wordt weergegeven door:

$$\Phi_V = K_m \cdot \sum V(\lambda) \cdot \frac{\Delta\Phi_e(\lambda)}{\Delta\lambda} \cdot \Delta\lambda \text{ (lm)}$$

Daarbij is Φ_v de lichtstroom, K_m de maximale fotopische lichtefficiëntie (683 $lm \cdot W^{-1}$) en $V(\lambda)$ de weegfactor voor het oog of de 'spectrale ooggevoeligheidsfactor' en $\Delta\lambda$ een klein golflengte gebiedje. Φ_e is de electromagnetische stralingsstroom uitgedrukt in W. De meer exacte notatie luidt:

$$\Phi_V = 683 \cdot \int_{360}^{830} V(\lambda) \cdot \frac{d\Phi_e}{d\lambda} \cdot d\lambda \text{ (lm)}$$

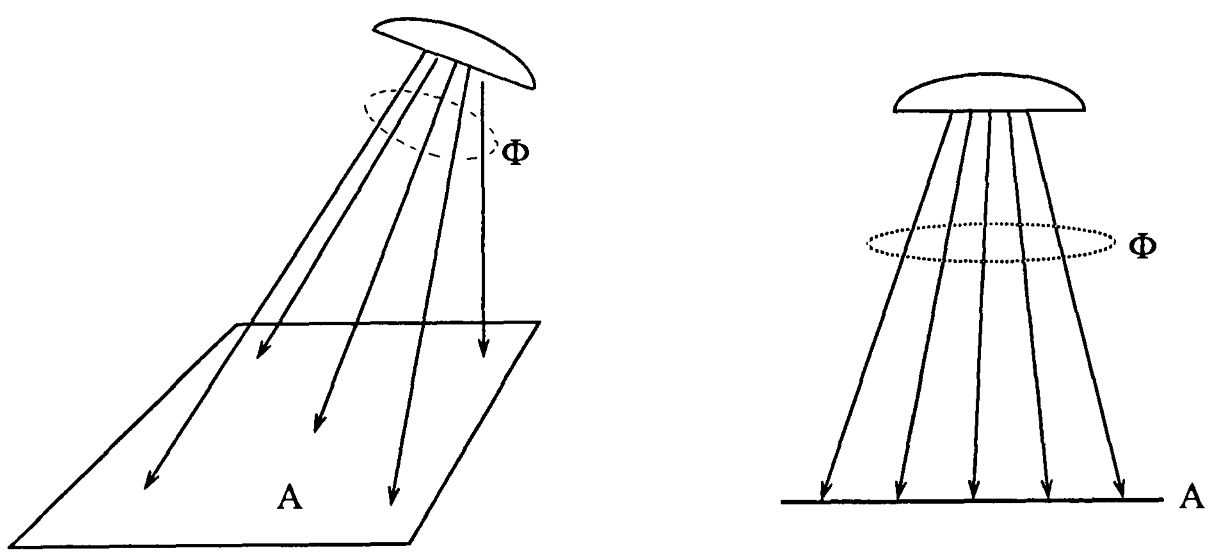
Ook de efficiëntie waarmee een lichtbron het toegevoerd vermogen P in licht omzet moet gekenmerkt worden. Dat rendement wordt uitgedrukt met η (èta) in lumen per Watt (lm/W).

$$\eta = \frac{\Phi_v}{P}\ (\mathrm{lm \cdot W^{-1}})$$

Ter illustratie enkele rendementen: gloeilampen ca. 12 ($\mathrm{lm \cdot W^{-1}}$), halogeen ca. 15 ($\mathrm{lm \cdot W^{-1}}$), TL 45 tot 85 ($\mathrm{lm \cdot W^{-1}}$).

VERLICHTINGSSTERKTE

Licht moet bruikbaar zijn. Het heeft alleen een nuttig effect op de plaats waar het gewenst is (allocatie). Het gaat uiteindelijk om de hoeveelheid licht per oppervlakte eenheid A op onze werkplek (afb.5). De lichtstroom alleen biedt daartoe onvoldoende maatstaf. Daarom is het begrip verlichtingssterkte E geïntroduceerd.



Afbeelding 5

Als de straling op het onderzochte oppervlak gelijkmatig (homogeen) is, is

$$E = \frac{\Phi}{A}\ (\mathrm{lx})$$ (in feite $\mathrm{lm \cdot m^{-2}}$; voor opvallend licht aangeduid met een aparte naam: de lux, afgekort lx)

Meer in het algemeen geldt als er lokale verschillen in verlichtingssterkte zijn voor een bepaald oppervlakte elementje ΔA:

$$E = \frac{\Delta\Phi}{\Delta A} \text{ (lx)}$$

of iets preciesER uitgedrukt:

$$E = \frac{d\Phi}{dA} \text{ (lx)}$$

Voor de kwantificering van de verlichting in werksituaties is niet alleen de verlichtingssterkte van belang. De betrouwbaarheid van waarnemingen hangt ook af van het contrast. Contrast is de mate waarin het verlichte oppervlak afsteekt tegen zijn achtergrond. Door de teruggeworpen hoeveelheid licht steken de goed reflecterende materialen helder af tegen een donkere achtergrond, of omgekeerd: slecht reflecterende materialen steken juist donker af tegen een heldere achtergrond. Een zwarte katoenen draad tegen een zwart-fluwelen achtergrond valt slecht op, zeer dunne glimmende metaal draden worden juist bij voorkeur tegen deze achtergrond geïnspecteerd. De maatstaf voor de op het oog teruggeworpen hoeveelheid licht is de lichtemittantie M. Evenals de verlichtingssterkte E is M gedefinieerd als:

$$M = \frac{\Phi}{A} \text{ (lm·m}^{-2}\text{)}$$ (N.B. nu, bij uitstralend licht, wordt alleen lm·m^{-2} gebruikt!)

Of als er lokale verschillen zijn als:

$$M = \frac{\Delta\Phi}{\Delta A} \text{ (lm·m}^{-2}\text{)}$$

In de limiet is dit weer:

$$M = \frac{d\Phi}{dA} \text{ (lm·m}^{-2}\text{)}$$

Reflectie speelt zowel bij zelflichtende materialen (TV, beeldscherm) als bij niet zelf-lichtende materialen een rol. Het verband tussen opvallend en teruggekaatst licht van niet-zelflichtende materialen wordt aangeduid met de reflectiecoëfficient ρ.

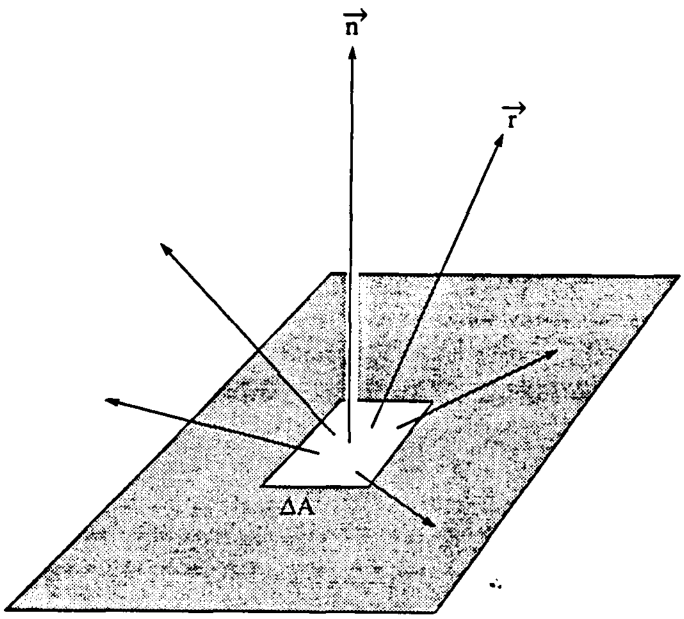
$$\rho = \frac{\Phi_{af}}{\Phi_{op}}$$

De waarde hiervan ligt tussen 0 en 1. De hoeveelheid in alle richtingen teruggeworpen licht per m^2 wordt weergegeven als:

$$M = \rho \cdot E \ (lm \cdot m^{-2})$$

DE HULPGROOTHEID LICHTSTERKTE

Om met licht te kunnen rekenen zijn naast de basisgrootheden nog enkele hulpgrootheden nodig. De belangrijkste hulpgrootheid is de lichtintensiteit of lichtsterkte I.



Afbeelding 6

Veronderstel een klein lichtgevend vlakje, bijvoorbeeld op een heetgestookte plaat, of een deel van een gloeispiraal (afb.6). Dat vlakje straalt in totaal een lichtstroom Φ uit. De waargenomen straling daarvan zal in het algemeen niet in alle richtingen even sterk zijn. Er is dus behoefte aan een richtingskarakteristiek voor licht, schematisch weergegeven met een vector-pijl.

Om van een bepaalde lamp de verlichtingssterkte op een werkvlak te bepalen, moet de lichtstroom op dat vlak bekend zijn. De sterkte van de lichtstroom in die specifieke richting wordt gekenmerkt door de lichtstroom per eenheid van ruimtehoek Ω, waarvoor weer een aparte naam, de candela, afgekort cd, is gekozen. Bij een isotrope straler is dit weer:

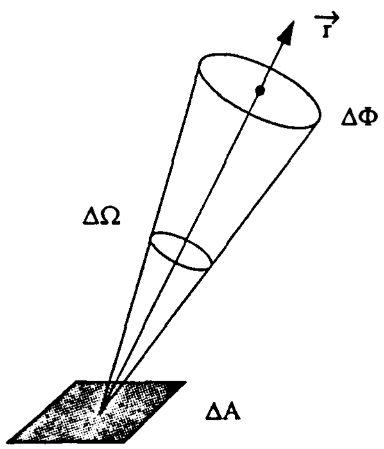
$$I = \frac{\Phi}{\Omega} \ (cd = lm \cdot sr^{-1})$$

Echter als de straling in alle richtingen niet even sterk is wordt dit in de richting $\vec{r}$ (afb.7)

$$I(\vec{r}) = \frac{\Delta\Phi(\vec{r})}{\Delta\Omega} \ (cd)$$

of exact:

$$I(\vec{r}) = \frac{d\Phi(\vec{r})}{d\Omega} \ (cd)$$



Afbeelding 7

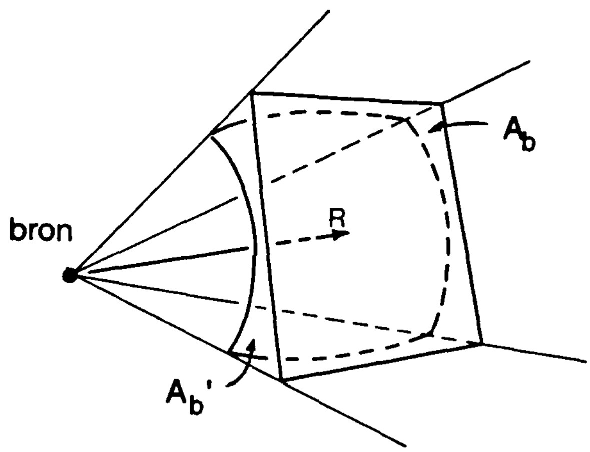
Hierbij staat I voor de lichtstroom per eenheid van ruimtehoek, sr voor de steradiaal, de eenheid van ruimtehoek (deze kegelvormige ruimte wordt van de totale bolvormige omgeving afgezonderd door berekening van het gedeelte $1/4\pi$ van die bolvormige omgevingsruimte). cd staat voor de candela, de eenheid van lichtsterkte, die gelijk is aan 1 lm per sr. Om in het algemeen de ruimtehoek te berekenen waarbinnen een puntvormig veronderstelde lichtbron straalt en waarvan de stralen het oppervlak A_b bereiken, denken we ons de lichtbron in het centrum van de bol met straal R en de projectie van dat oppervlak op de bolwand A_b' (afb.8). De ruimtehoek waar binnen het licht straalt is per definitie

$$\Omega = \frac{A_b'}{4 \cdot \pi \cdot R^2} \cdot 4 \cdot \pi \ (sr)$$

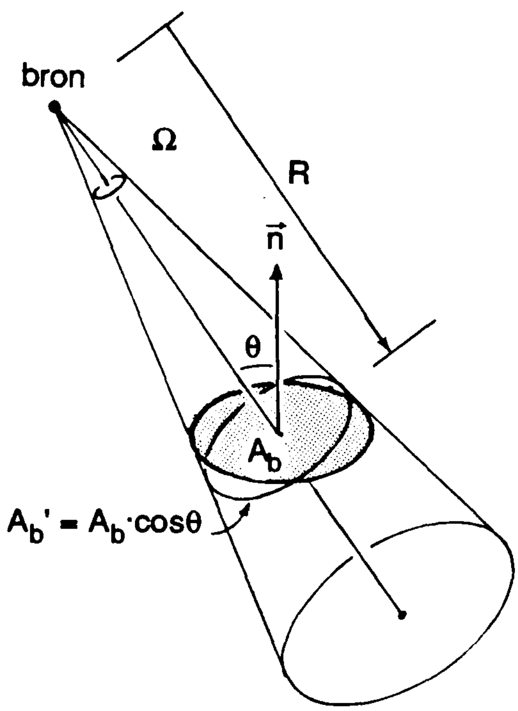
Als de normaal op A_b een hoek θ maakt met de lijn door het centrum en als R voldoende groot is, is A_b' ongeveer gelijk aan $A_b \cdot \cos\theta$.(afb. 9), dus dan is:

$$\Omega = \frac{A_b \cdot \cos\theta}{R^2} \quad (sr)$$

Als $\cos\theta = 1$ en $A_b = 1$ m^2 op een afstand van $R = 1$ m dan hebben we dus de eenheid van ruimtehoek $\Omega = 1$ (sr).



Afbeelding 8



Afbeelding 9

PRACTISCH REKENEN

Laat ons nu een practische toepassing van de lichtsterkte bekijken. Gegeven een lichtbron met lichtsterkte I in de richting van het werkvlak(afb. 10). Per definitie is:

$$E = \frac{\Delta\Phi_{\Delta A_1}}{\Delta A_1} = \frac{I \cdot \Delta\Omega}{\Delta A_1} = \frac{I \cdot \Delta A_1}{\Delta A_1 \cdot h^2} = \frac{I}{h^2}$$

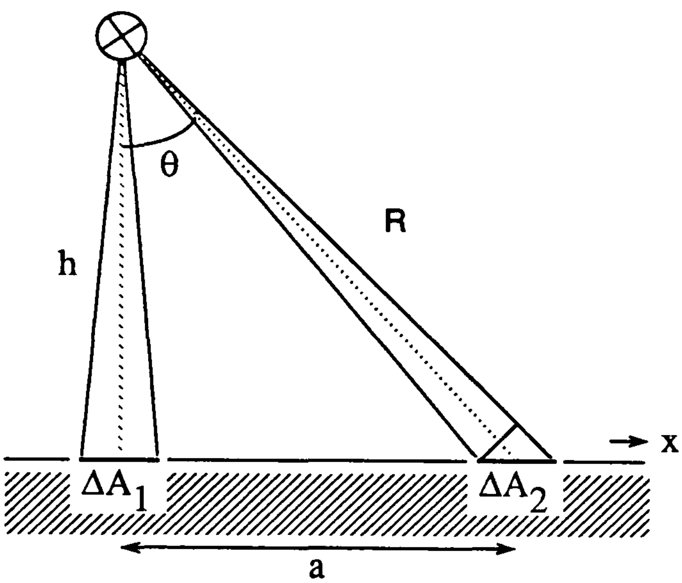
en voor vlakje ΔA_2 geldt:

$$E = \frac{\Delta\Phi_{\Delta A_2}}{\Delta A_2} = \frac{I \cdot \Delta\Omega}{\Delta A_2} = \frac{I \cdot \Delta A_2 \cdot \cos\theta}{\Delta A_2 \cdot R^2} = \frac{I \cdot \cos^3\theta}{h^2}$$

De verlichtingssterkte varieert hierbij dus met het kwadraat van de afstand (kwadratenwet). Dat gaat dus hard!

Een bijzondere lichtbron is de isotope straler. De lichtsterkte van een isotrope straler is in alle richtingen even groot. Dus $I(\vec{r}) = I(0) = I$. De totale lichtstroom wordt

$$\Phi = 4 \cdot \pi \cdot I \text{, ofwel } I = \frac{\Phi}{4 \cdot \pi}$$



Afbeelding 10

In allerlei praktijkgevallen vormt het principe van de isotrope straler een redelijke benadering van de werkelijkheid. Neem bijvoorbeeld een naakte gloeilamp van 100 W ($\eta = 12$ lm·W^{-1}) 1 m boven een werktafel. Wil men een schatting van de verlichtingssterkte op die tafel, dan beschouwt men die gloeilamp in eerste aanleg als een isotrope straler.

$$I = \frac{\Phi}{4 \cdot \pi} = \frac{\eta \cdot P}{4 \cdot \pi} = \frac{12 \cdot 100}{4 \cdot \pi} = 95.5 \text{ cd}$$

$$\frac{h}{R} = \cos\theta \text{ ofwel: } R = \frac{h}{\cos\theta}$$

$$E = \frac{I \cdot \cos^3\theta}{h^2} \quad \text{Bij invalshoek } \theta = 45°\text{: } E = 33.7 \text{ lx;}$$

$$\text{bij } \theta = 60°\text{:} E = 11.9 \text{ lx.}$$

LUMINANTIE

Tot nog toe ging het om geconcentreerde lichtbronnen, maar in de praktijk van de ergonomie heeft men vooral te maken met grote lichtbronnen of grote lichtgevende vlakken. De lichtsterkte per oppervlak, die een soort lichtdichtheid is, ervaren we als helderheid. De fysische grootheid

$$L(\vec{r}) = \frac{\Delta I(\vec{r})}{\Delta S} \text{ (cd·m}^{-2}\text{)}$$

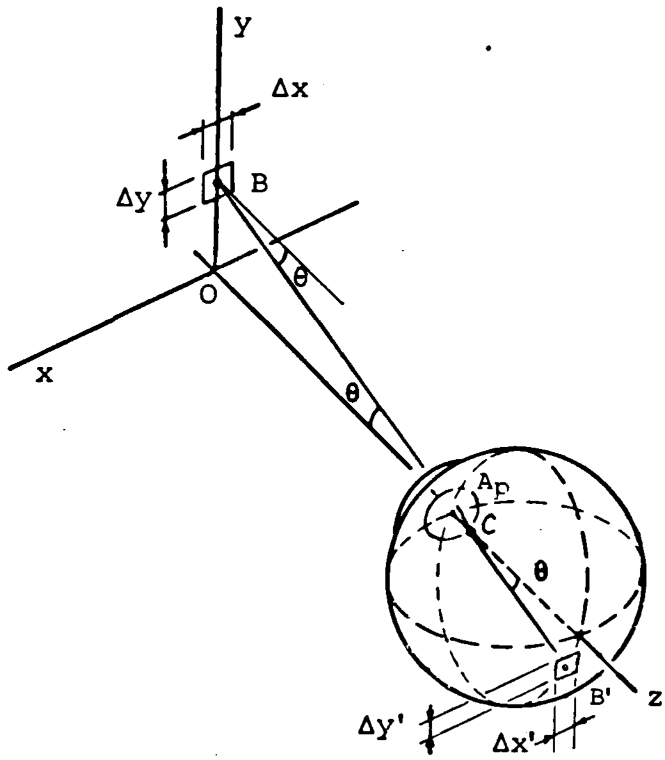
heet luminantie en deze vormt veruit het belangrijkste rekengegeven voor de verlichtings-ergonoom (daarbij is S het schijnbaar oppervlak en $I(\vec{r})$ de lichtsterkte, beiden in de richting van de waarnemer). Voor een zeer klein vlakje wordt dit weer

$$L(\vec{r}) = \frac{dI(\vec{r})}{dS} \text{ (cd·m}^{-2}\text{)}$$

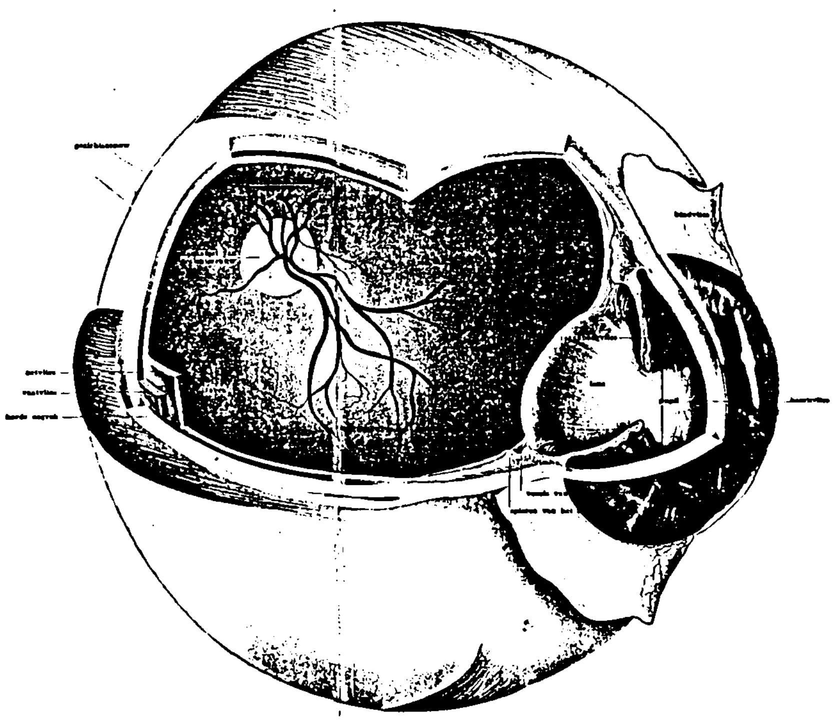
Luminantie vertaald zich in verlichtingssterkte van de fotogevoelige elementen van het oog, de retinale verlichtingssterkte. De verlichtingssterkte van de receptoren in het oog verloopt evenredig met de luminantie. Dit is gemakkelijk af te leiden:

Neem een element van een stralende wand met oppervlak $\Delta x \Delta y$ (afb. 11). Het van dit element komend licht dat het irisdiafragma, de pupil, passeert valt op het netvlies (afb. 12). Als de luminantie van dit elementje in de richting van de pupil gelijk is aan

$$L(\theta) = \frac{\Delta I(\theta)}{\Delta S} = \frac{\Delta I(\theta)}{\Delta x \cdot \Delta y \cdot \cos\theta},$$



Afbeelding 11



Afbeelding 12

dan is de intensiteit in de richting van de pupil

$$\Delta I(\theta) = L(\theta)\cdot \Delta x \cdot \Delta y \cdot \cos\theta$$

en de lichtstroom die door de pupil gaat is

$$\Delta\Phi = \Delta I(\theta)\cdot \Delta\Omega = L(\theta)\cdot \Delta x \cdot \Delta y \cdot \cos\theta \cdot \frac{A_p \cdot \cos\theta}{BC^2},$$

dus

$$\Delta\Phi = \frac{L(\theta)\cdot A_p \cdot \Delta x \cdot \Delta y \cdot \cos^2\theta}{BC^2} \text{ (lm)}$$

De oogmedia zijn niet volkomen doorzichtig. Als de effectieve transmissie gelijk is aan τ, dan valt op het netvlies dus een lichtstroom groot $\tau \cdot \Delta\Phi$. De verlichtingssterkte op het netvlies tengevolge van het stralend elementje $\Delta x \Delta y$ waarnaar we kijken is dus

$$E_r = \frac{\tau \cdot \Delta\Phi}{\Delta x' \cdot \Delta y'} .$$

Daar het knooppunt van het oog gemiddeld op 17 mm van het netvlies ligt kunnen we de zijden van de afbeelding $\Delta x'$ en $\Delta y'$ uitdrukken in die van het origineel Δx en Δy en de afstand BC door gebruik te maken van de gelijkvormigheidswetten:

$$\Delta y : (BC \cdot \cos\theta) = \Delta y' : 17 \cdot 10^{-3}, \text{ dus}$$

$$\Delta x' \cdot \Delta y' = \left(\frac{17 \cdot 10^{-3}}{BC \cdot \cos\theta}\right)^2 \cdot \Delta x \cdot \Delta y .$$

Invullen levert

$$E_r = \tau \cdot \frac{L \cdot A_p \cdot \Delta x \cdot \Delta y \cdot \cos^2\theta}{BC^2} \cdot \frac{BC^2 \cdot \cos^2\theta}{(17 \cdot 10^{-3})^2 \cdot \Delta x \cdot \Delta y}$$

Als $\theta \approx 0°$, dan is $\cos^4\theta \approx 1$ en

$$E_r = 3.5 \cdot 10^3 \cdot \tau \cdot L \cdot A_p \text{ (lx)}$$

De transmissie τ van de oogmedia is gemiddeld ongeveer 0.5. Men heeft voor het gemak een nieuwe eenheid van retinale verlichtingssterkte ingevoerd: de Troland, afgekort Td. Deze is gedefinieerd door

$$E_r = L \cdot A_p \quad (\mathrm{Td}), \quad \text{met } L \text{ in } (\mathrm{cd \cdot m^{-2}}) \text{ en } A_p \text{ in } \mathrm{mm^2}]$$

Men kan deze verlichtingssterkte vertalen in lux door

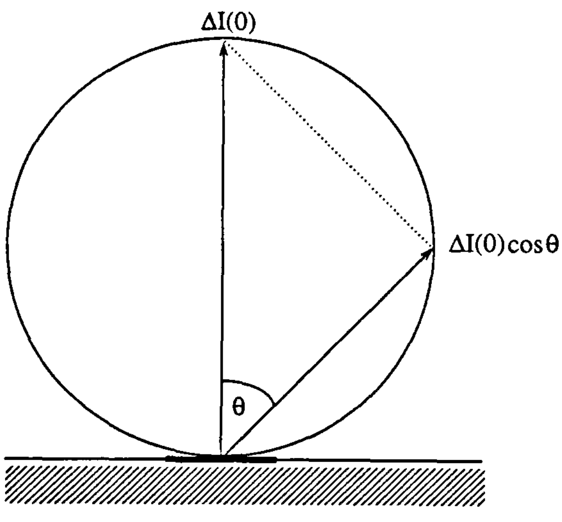
$$1\ \mathrm{Td} \approx 2 \cdot 10^{-3}\ \mathrm{lx}$$

Bij het gebruik van retinale verlichtingssterkte wordt dus gecorrigeerd voor variatie in het pupiloppervlak, die maximaal een factor 16 kan bedragen. De pupil diameter kan betrekkelijk eenvoudig worden gemeten. Bij perceptieonderzoek maakt men ook wel gebruik van een kunstpupil, een cirkelvormig gat concentrisch met de eigen pupil, waardoor men het object waarneemt, met een diameter van ca. 2 mm, de kleinst voorkomende opening.

DE DIFFUSE STRALER

In de praktijk is de diffuse of Lambertse straler van belang. Bij een diffuus stralend oppervlak is de luminantie onafhankelijk van de hoek θ met de normaal, de loodlijn op dat vlak, waaronder naar dat vlak wordt gekeken dus

$$L(\theta) = L(0)$$



Afbeelding 13

Dit betekent dat de helderheid van het vlak onafhankelijk is van die kijkhoek. Hieraan voldoet b.v. in veel gevallen een projectiescherm (of een daartoe gespannen laken) of het scherm van een TV-toestel. Aan

$$L = \frac{\Delta I}{\Delta A \cdot \cos\theta} = \text{constant}$$

kan alleen worden voldaan als

$$I(\theta) = I(0).\cos\theta$$

Deze voorwaarde staat bekend als de cosinuswet van Lambert (afb. 13). Als hieraan wordt voldaan kan men berekenen dat

$$L = \frac{M}{\pi} = \frac{\rho \cdot E}{\pi} \quad (cd \cdot m^{-2})$$

Deze relaties, waarvan de laatste geldt voor een reflecterend vlak, blijken in de praktijk bijzonder handig.

Een voorbeeld: Bereken de luminantie tengevolge van een diaprojector, 200 W, $\eta = 10$ ($lm \cdot W^{-1}$), 70% lichtrendement, met een beeldgrootte van 1,60 X 1,20 m^2. Op een doek met een reflectiecoëfficient van 70%.

Antwoord: Een doek reflecteert diffuus.

$\Phi = 200x10x0.7 = 1400$ lm

$A = 1.60x1.20 = 1.92$ m^2

$E = 727.2$ lx

$M = \rho \cdot E = 581.8$ $lm \cdot m^{-2}$

$L = 185.2$ $cd \cdot m^{-2}$

BREDE BAND FOTOMETRIE
LUX- EN LUMINANTIEMETERS

Verlichtingssterkte wordt gemeten met een luxmeter. Hij bestaat uit een transductor of fotocel, die het licht omzet in een electrisch signaal en een digitaal of analoog aanwijzend instrument waarvan het bereik, dat gewoonlijk tussen 1 en 10^4 lx ligt, kan worden ingesteld (afb. 14).

De cel bevat een lichtgevoelige laag die een spectrale gevoeligheid $S(\lambda)$ heeft, en waarvoor zich gewoonlijk een filter bevindt met een golflengte afhankelijke doorlating $\tau(\lambda)$. Bij een ideale aanpassing is de aanwijzing

$$E = \frac{\Phi}{A} = \frac{K_m}{A} \sum_i V(\lambda_i) \cdot \frac{\Delta\Phi_e(\lambda_i)}{\Delta\lambda} \cdot \Delta\lambda =$$

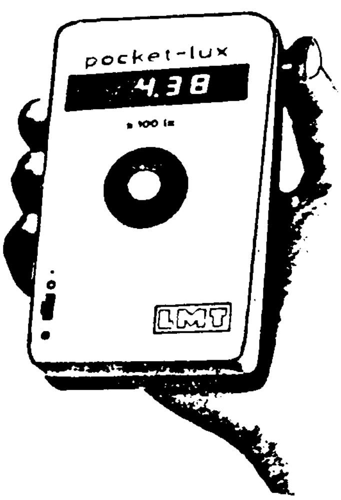
$$\frac{G}{A} \sum_i S(\lambda_i) \cdot \tau(\lambda_i) \cdot \frac{\Delta\Phi_e(\lambda_i)}{\Delta\lambda} \Delta\lambda$$

Of in integraalvorm

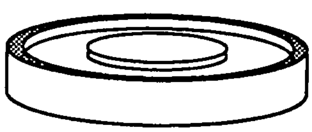
$$E = \frac{K_m}{A} \int_0^{\infty} V(\lambda) \cdot \frac{d\Phi_e}{d\lambda} \cdot d\lambda = \frac{G}{A} \int_0^{\infty} S(\lambda) \cdot \tau(\lambda) \cdot \frac{d\Phi_e}{d\lambda} d\lambda$$

Hierin is G de versterkingsfactor en A het oppervlak van de gevoelige laag. Dus een meetapparaat is goed aangepast als:

$$K_m \cdot V(\lambda) = G \cdot S(\lambda) \cdot \tau(\lambda)$$

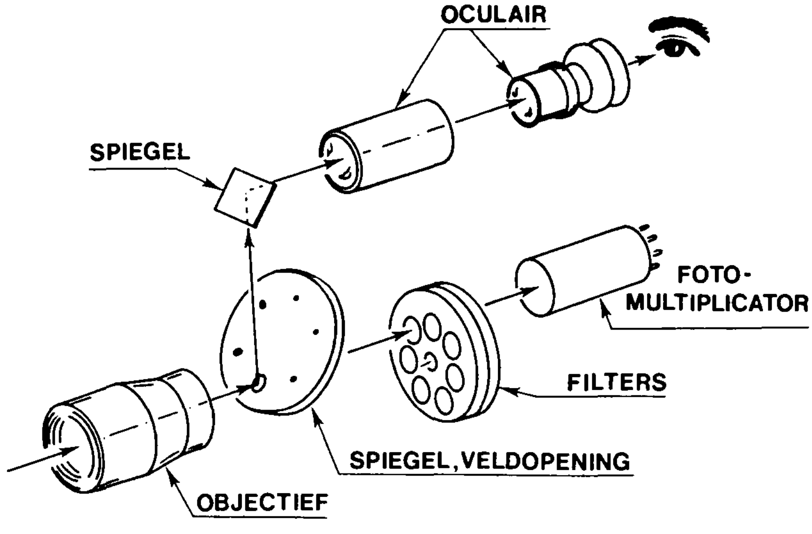


Afbeelding 14



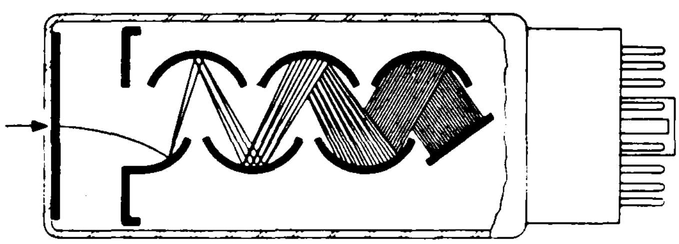
Afbeelding 15

Bij zeer schuine inval kan er nog iets fout gaan tengevolge van een sterk toegenomen golflengte afhankelijke spiegelende reflectie. Ter correctie is daarom de fotocel vaak voorzien van een zg. cosinuskap, waarvan de vorm zodanig is dat voor de fouten wordt gecorrigeerd (afb. 15).



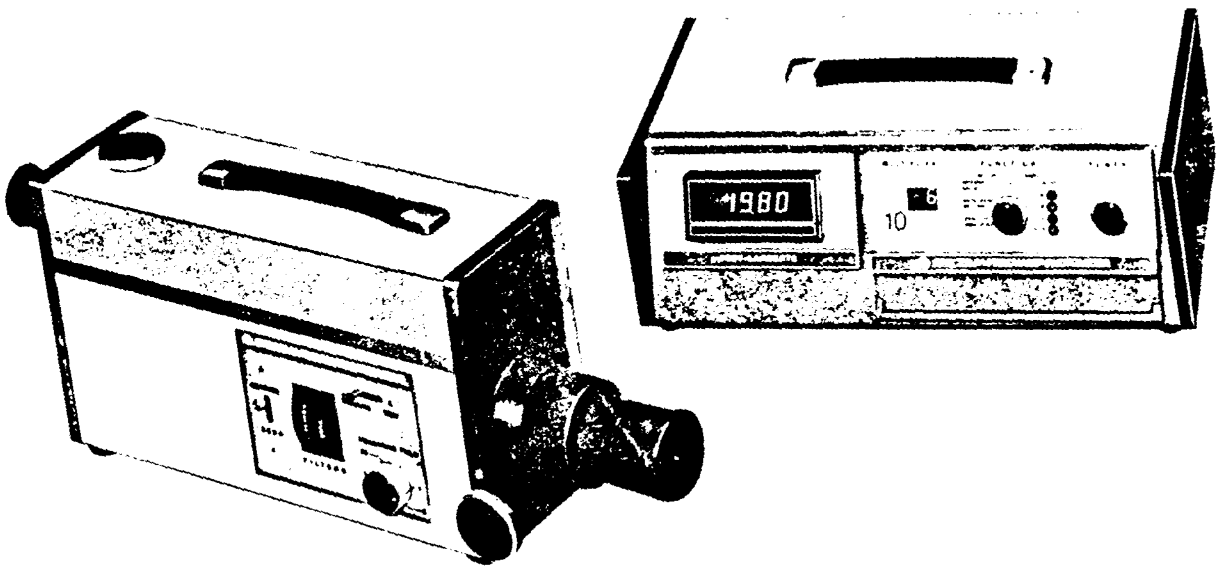
Afbeelding 16

Tenslotte noemen we de luminantiemeter. Deze werkt ongeveer als het oog. Door een lenzenstelsel wordt het te meten vlak op een gevoelige laag afgebeeld. Met behulp van een diafragma wordt het te meten oppervlakteelement afgezonderd. Een oculair en de spiegel waarin het diafragma is geboord geeft de mogelijkheid de meter op het gewenste vlakje te richten (afb. 16).



Afbeelding 17

Daarbij nog iets over de fotomultiplicator die wordt gebruikt als transductor bij de meest gevoelige luminantiemeters (afb. 17). Een electron wat aan de gevoelige laag door een foton wordt vrijgemaakt wordt versneld naar een zgn. dynode. Door de toegenomen energie worden secundaire electronen uit deze dynode vrijgemaakt die weer worden versneld naar de volgende dynode, etc. Hiermee kan een versterkingsfactor van 10^6 worden gehaald. Een nadeel is dat er voor de versnelling hoogspanning nodig is, circa 100 V per dynode, dat een klemspanning van circa 1200 V betekent. Dit maakt een luminantiemeter op basis van fotomultiplicatie tamelijk volumineus (afb.18).



Afbeelding 18