

-
- **HOGESCHOOL**
's-Hertogenbosch
-
-

POST-HBO CURSUS

BOUWFYSICA

Licht

INLEIDING IN DE VERLICHTINGSKUNDE

READER I

samengesteld door
november 93

AJF Rutten
TU Eindhoven

Eerste druk 1992
tweede druk 1993

© 1992 AJF Rutten, Nuenen
Niets van de inhoud mag worden vermenigvuldigd, openbaar gemaakt of in de handel
gebracht zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de auteur.

INHOUD

1. INLEIDING	1
1.1. LICHT MOET GEDOSEERD WORDEN.	3
2. LICHT- EN STRALINGSGROOTHEDEN	7
2.1. LICHT MAAKT ZICHTBAAR	7
2.2. LICHT EN STRALING	8
2.3. GROOTHEDEN EN EENHEDEN	11
2.3.1. LICHTHOEVEELHEID EN STRALINGSENERGIE	12
2.3.2. LICHTSTROOM EN STRALINGSSTROOM	12
2.3.3. VERLICHTINGSSTERKTE EN IRRADIANTIE	13
2.3.4. LICHT- EN STRALINGSEMITTANTIE	14
2.4. STRALINGSWETTEN	14
2.5. ENERGETISCHE VERSUS LICHTGROOTHEDEN	18
2.6. NOG ENKELE LICHTGROOTHEDEN	19
2.6.1. LUMINANTIE, RUIMTEHOEK	19
2.6.2. LICHTSTERKTE	21
2.7. DE ENERGIE-INHOUD VAN LICHT	22
2.7.1. SPECTRALE OOGGEVOELIGHEID	22
2.7.2. MAXIMALE SPECTRALE LICHTEFFICIËNTIE	23
2.7.3. LICHTRENDEMENT	23
2.7.4. ENERGIEVERBRUIK EN LAMPKOSTEN	24
3. BEREKENING VAN DE DIRECTE VERLICHTINGSSTERKTE	27
3.1. INVERSE-KWADRATEN WET	27
3.1.1. LICHTSTROOM VAN EEN ALZIJDIG EN HOMOGEEN STRALENDE PUNTBRON	30
3.2. PRAKTIJKPROBLEMEN	31
3.2.1. DOORLATING-, REFLECTIE- EN ABSORPTIEFACTOREN	32
3.2.2. LICHTSTERKTE DIAGRAM	34
3.3. ALGEMENE VERLICHTINGSFORMULE	37
3.3.1. CIRKELVORMIGE LAMBERTSTRALER	39
3.3.2. RECHTHOEKIGE LICHTBRONNEN	41
3.3.3. LICHTTOETREDING TOT DAGLICHTOPENINGEN	45
3.3.4. PRAKTIJKPROBLEMEN	46
3.3.5. VERBAND TUSSEN DE LUMINANTIE EN DE EMITTANTIE	47
3.4. INVERSE-KWADRATEN WET EN FOUTEN-PROGNOSE	48
3.4.1. SYSTEMATISCHE FOUT	48
3.4.2. TOEVALLIGE FOUT	50
3.4.3. SIGNIFICANTE CIJFERS	51
3.4.4. FOUTEN-PROGNOSE	52

INHOUD

3.5. GRAFISCHE BEPALING VAN DE ALGEMENE VERLICHTINGSFORMULE	50
3.5.1. CONFIGURATIEFACTOR: HEMELFACTOR	56
3.5.2. RADIAALDIAGRAM	58
4. HANDBEREKENINGEN EN DE TOTALE VERLICHTINGSSTERKTE	63
4.1. INTERREFLECTIES — DE INDIRECTE VERLICHTINGSSTERKTE	63
4.2. VERLICHTINGSREGEL VOOR "OMSLOTEN" RUIMTEN.	64
4.3. BEPERKINGEN VAN DE VERLICHTINGSREGEL	67
4.4. VOORWAARDEN VOOR DE VERLICHTINGSREGEL	69
4.4.1. GEMIDDELDE VERLICHTINGSSTERKTE IN EEN RUIMTE	69
4.4.2. GEMIDDELDE VERLICHTINGSSTERKTE OP EEN ZEER GROOT VLOEROPPERVLAK VAN EEN HAL	70
4.5. TOEPASSING VAN DE VERLICHTINGSREGEL OP DAGVERLICHTING	71
4.6. PRAKTIJKPROBLEMEN	75
5. NORMEN EN AANBEVELINGEN VOOR VERLICHTING	77
5.1. MINIMUM VEREIST VERLICHTINGSNIVEAU	81
5.2. LUMINANTIEVERHOUDINGEN	82
5.3. DAGVERLICHTING	82
5.3.1. HEMELFACTOR	82
5.3.2. VERHOUDING RAAMOPPERVLAK TOT VLOEROPPERVLAK	83
5.3.3. DAGLICHTBESCHIKBAARHEID	85
5.4. BOUWBESLUIT 1992	88
5.4.1. NEN 2057 "DAGLICHTOPENINGEN VAN GEBOUWEN"	90
5.5. ARBEIDSSOMSTANDIGHEDENWET	92
5.5.1. VEILIGHEIDSBESLUITEN	97
6. APPENDIX	101
6.1. PRAKTIJKPROBLEMEN	101
6.2. UITKOMSTEN	103
6.3. OM VERDER TE LEZEN EN TE KIJKEN	105
6.4. OVERZICHT VAN DE WEERGEGEVEN TABELLEN	106

Tegenwoordig hanteert men hiervoor graag de term 'ergonomie'. Dit begrip dekt echter maar ten dele wat er bij het ontwerp van het werkmilieu in verlichtingskundige zin komt kijken. Het mensgecentreerde verlichtingskundig ontwerp grijpt bijvoorbeeld in op de dimensionering van ramen en ruimten, op de afwerking van wanden, terwijl ook energetische overwegingen in het — verlichtingskundig — ontwerpproces dienen te worden betrokken. Daarnaast is de mens niet alleen een werkend individu; hij woont en recreëert en verplaatst zich. Ook daar is de kennis van hoe je het binnenmilieu kwalitatief goed kunt beheersen van groot belang.

Ergonomie:

Het zodanig ontwerpen van producten, gereedschappen, werkomgeving en werkmethoden dat een optimale efficiency, veiligheid en comfort wordt bereikt bij de bediening en onderhoud van het mens-machine-systeem. Definitie Nederlands Instituut voor Arbeidsomstandigheden (NIA)

■ Om de gedachten te bepalen een enkel voorbeeld.

- Hoe zorg je er in een zwembad voor dat de zwemmer het niet te koud heeft, de toeschouwer het niet te warm krijgt en zijn zicht niet gestoord wordt door al te heldere glasoppervlakken.
- Met welk lichtniveau kan worden volstaan om een spoorboekje te lezen? Is het misschien verstandiger — als je dit soort priegeltaksten moet lezen — naar andere middelen te zoeken: loep, tekst vooraf vergroten?

■ Hiermee zijn we gekomen op het onderwerp van dit trimester: het verkrijgen van basiskennis en -vaardigheden op het gebied van de verlichtingskunde.

Ter sprake komen onderwerpen als:

Wat is licht?

Hoe beschrijf je licht?

Hoe bereken je de "hoeveelheid" licht?

Gaat het om "lichthoeveelheid" of om de hoeveelheid licht per seconde?

Hoe doseer je licht?

Welke normen worden gesteld?

In het algemeen is een en ander zowel voor daglicht als voor kunstlicht toepasbaar.



1.1. LICHT MOET GEDOSEERD WORDEN.

■ Licht is een belangrijke component in onze leefwereld. We kunnen de omgeving pas zien doordat er licht is en dit licht bovendien niet 'egaal' is. Ook komt 'lichtheid' eerst goed tot zijn recht als er ook – relatieve – duisternis is.

■ Licht kan op vele manieren worden toegepast: Het is een communicatiemiddel, een gebruiksmiddel en een bron van hinder.

■ Licht wordt in de volgende voorbeelden in positieve zin gebruikt.

Als aandachtstrekker: lichtreclame, etalage-verlichting.

Als terrein-afbakening: het kampvuur van onze voorouders, de terreinverlichting om woningen en gebouwen.

Om sfeer te maken: feestverlichting, schouwburgverlichting, toneelverlichting.

Als vormgever: museum, beeldengalerij, flood-lighting.

Als visuele geleiding: wegverlichting, routing in grote ruimten.

Als werkverlichting: tekenzaal, kantoor, fabriek.

■ Licht kan ook een bron van hinder of ongewenste afleiding zijn, zoals:

Verblinding: feestverlichting in een werkplaats geeft verblinding.

Grote helderheidsverhoudingen: zoninstraling in een deel van het vertrek maakt zo'n grote helderheid, dat de rest van het vertrek, of zelfs de oogtaak, veel te donker lijkt.

Glans: de verlichting boven een leestafel veroorzaakt hinderlijke reflecties, waardoor een deel van een tekst onleesbaar wordt.

sterk contrast



zwak contrast



* Jannske Wesseling bespreekt in NRC van 24-4-'93 de tentoonstelling "Ontmoeting van meesterwerken", in het bijzonder de schilderijen "Straatje" van Johannes Vermeer (1632-1675) en "De binnenplaats van een huis in Delft" van Pieter de Hoogh (1629-1684). Zij zegt onder meer:

"Het opvallendste verschil tussen de twee schilderijen, althans zoals ze in het Rijksmuseum gepresenteerd worden, is de lichtwerking. Beyreemdend genoeg is het licht bij De Hoogh warmgeel, je zou zeggen zuidelijk; het is hoe dan ook geen Delfts licht. Maar hier wordt De Hoogh groot onrecht aangedaan. Vermeer ook, maar De Hoogh heeft er meer last van. De glazen overkapping van het kabinet suggereert valselijk daglicht: aan een balk zijn twee grote, niet lampen of spotlights, maar schijnwerpers, nee, verstralers, bevestigd, en pal gericht op de schilderijen. Ze zetten ze in een genadeloos schel licht. Alsof de zon er verblindend in schijnt, terwijl op beide doeken de lucht duidelijk bewolkt is. Hoe is het mogelijk dat een museum, het Rijksmuseum nog wel, kunstvoorwerpen op een dergelijke *flaasly*, alles doodslaande manier belicht?"

Vijf minuten voor sluitingstijd gingen de lampen uit. Ik kon stiekem de zaal weer even inglippen. Het zoetige geel van De Hoogh bleek verdwenen. Het licht was nu zoals het hoort, Hollands en diffuus, een regenachtige dag; de kleuren zacht en gedempt. En nog meer diepte. Zo komen ze tot hun recht, beide tafereelen rustig en intiem, de peinzende vrouw in de gang van De Hoogh en het handwerkende vrouwtje in de deuropening van Vermeer geheel in zichzelf verzonken."

Kleurverschuiving: grote vlakken in een verzadigde kleur vervormen de kleurwaarneming in een ruimte.

■ *Kortom, licht kan maar niet willekeurig worden toegepast: het moet gedoseerd worden; afgestemd op de oogtaak, de mens en zijn omgeving.*

■ Enkele termen die de verlichtingskundige vaak gebruikt, zijn:

Adaptatie: aanpassing van het oog aan het heersende lichtniveau.

Accommodatie: aanpassing van de brandpuntafstand van de ooglens aan de verwijdering van het waar te nemen object, zodat van dat object een scherpe afbeelding op het netvlies van het oog ontstaat.

Contrast: scherpe overgang van licht naar donker in direct aanliggende vlakjes; geen zichtbaarheid zonder contrast.

Diffuus (invallend) licht: licht dat vanuit vele richtingen een object bereikt; schaduwen worden vrijwel niet gevormd.

Diffuus (uitgestraald) licht: licht van een lichtbron, waardoor deze lichtbron gezien vanuit verschillende richtingen een gelijkmatige helderheid heeft. De lichtbron heeft in de regel een wat groter opper-

vlak, waardoor objecten diffuus kunnen worden verlicht.

Gericht licht: licht dat van één (of een enkele) kant een object bereikt; er kunnen diepe (slag-)schaduw-
wen ontstaan.

Direct licht: licht dat zonder reflecties aan gebouwdelen een object bereikt.

Indirect licht: licht dat na reflectie aan een bouwdeel een object bereikt. (Indirect licht is meestal meer diffuus dan direct licht).

Verblindings: proces waarbij een hoge helderheid in het gezichtsveld de gewenste adaptatietoestand van het oog verstoort.

DOELSTELLINGEN HOOFDSTUK I

Na het doorwerken van dit hoofdstuk dien je:

- *te kunnen uitleggen wat het belang van de Bouwfysica in de Bouwkunde is en dit te kunnen toelichten met enkele voorbeelden;*
 - *een beeld te hebben van het belang van licht in het dagelijks leven van de mens, en daarvoor enkele voorbeelden te kunnen noemen;*
 - *enkele kwaliteitskenmerken en termen uit de verlichtingskunde te kennen en de betekenis te weten;*
-

2. LICHT- EN STRALINGSGROOTHEDEN

2.1. LICHT MAAKT ZICHTBAAR

Wanneer wij om ons heen kijken, zien wij onze omgeving dankzij twee vormen van licht: het daglicht en het kunstlicht. Deze vormen zijn genoemd naar de aard van de bron.

■ De bron van het daglicht is de zon. Hoewel de zon continu blijft schijnen is er 's nachts geen of vrijwel geen licht van de zon te bespeuren. Hoe komt dat? 's Nachts bevinden we ons in de schaduw van de aarde zelf: een belangrijke conclusie is dat licht zich rechtlijnig voortplant.

■ Hoewel het zonlicht langs de aarde de wereld ruimte ingaat, zien wij het niet omdat het ons oog niet bereikt. In de zomernachten, als de zon niet zo ver onder de horizon staat, zijn de nachten niet zo donker: het zonlicht wordt in de bovenste lagen van de atmosfeer aan de zeer hoge bewolking verstrooid. Pas na deze verstrooiing, en als het licht dan ons oog bereikt, zien wij licht. Ook overdag zou zonder verstrooiing in de atmosfeer de hemel donker zijn met slechts een fel brandende zon.

Andere voorbeelden vinden we in de woning: de daar zwevende stofdeeltjes worden eerst goed zichtbaar als de zon erop schijnt; of in het bos in de herfst: de bundels zonlicht die door de boomkruinen schijnen, worden goed zichtbaar door de verstrooiing in de nevel.

■ Bronnen van kunstlicht zijn o.a. de fakkel, de kaars, het kampvuur, de gloeilamp, de fluorescentielamp.

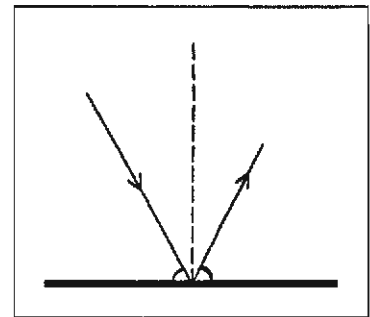
■ De gebouwde omgeving kunnen we voornamelijk zien door terugkaatsing of reflectie van licht aan objecten. Als twee uitersten van reflectievormen noemen we diffuse reflectie enerzijds en spiegelende reflectie anderzijds. (Vergelijk een beslagen en een heldere spiegel!).

Bij de volledig-diffuse reflectie wordt een op een vlak vallende lichtbundel alzijdig verstrooid; uit de verstrooide bundel is de richting van de invallende bundel niet meer te achterhalen. Soms is er toch nog een voorkeursrichting in de teruggekaatste bundel (een beetje beslagen spiegel); allerlei mengvormen van diffuse en gerichte reflectie kunnen dan optreden.

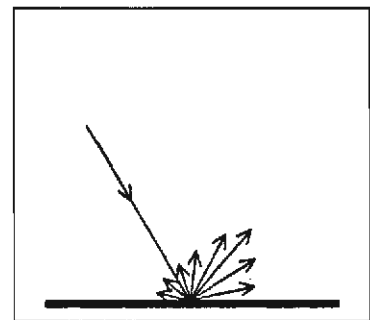
Bij spiegelende reflectie blijft de bundelvorm behouden: de wet van Snellius geldt en er is dus beeldvorming mogelijk.

De reflectie van licht aan gebouwdelen kan veelal goed met het diffuse-reflectie mechanisme beschreven worden (zie ook §3.3.4). Als verdere processen die licht in de gebouwde omgeving kunnen ondergaan, noemen we transmissie (licht door vensterglas heen) en absorptie (licht dat door donkere voorwerpen niet meer wordt teruggekaatst).

spiegelend



diffuus-gericht



2.2. LICHT EN STRALING

De zon geeft ons niet alleen het daglicht: als we in de zon zitten kan dat behaaglijk warm zijn. En als de zon een tijdje in een kamer schijnt kan het er behoorlijk warm worden. We zeggen dat met het zonlicht, of beter de zonnestraling, de warmte binnenkomt: de zonnestraling levert een vorm van energie. Zoals er, naast warmte, andere vormen van energie zijn: mechanische energie, kinetische energie, potentiële energie, elektro-magnetische energie.

■ We kunnen ook zeggen dat met de zonnestraling stralingsenergie aan de aarde wordt toegevoerd. Zonnestraling is een vorm van *energietransport*.

■ Bekend is dat zonnestraling en zonlicht een elektro-magnetisch golfverschijnsel zijn, en deel uitmaken van een veel breder elektro-magnetisch spectrum. Het stralingsgebiedje met een golflengte tussen de 380 en 780 nm, *dat een helderheidsindruk in ons oog geeft*, noemen wij licht. E.M.-golven die wij niet volgens de karakteristieken van ons oog waarden, noemen we straling.

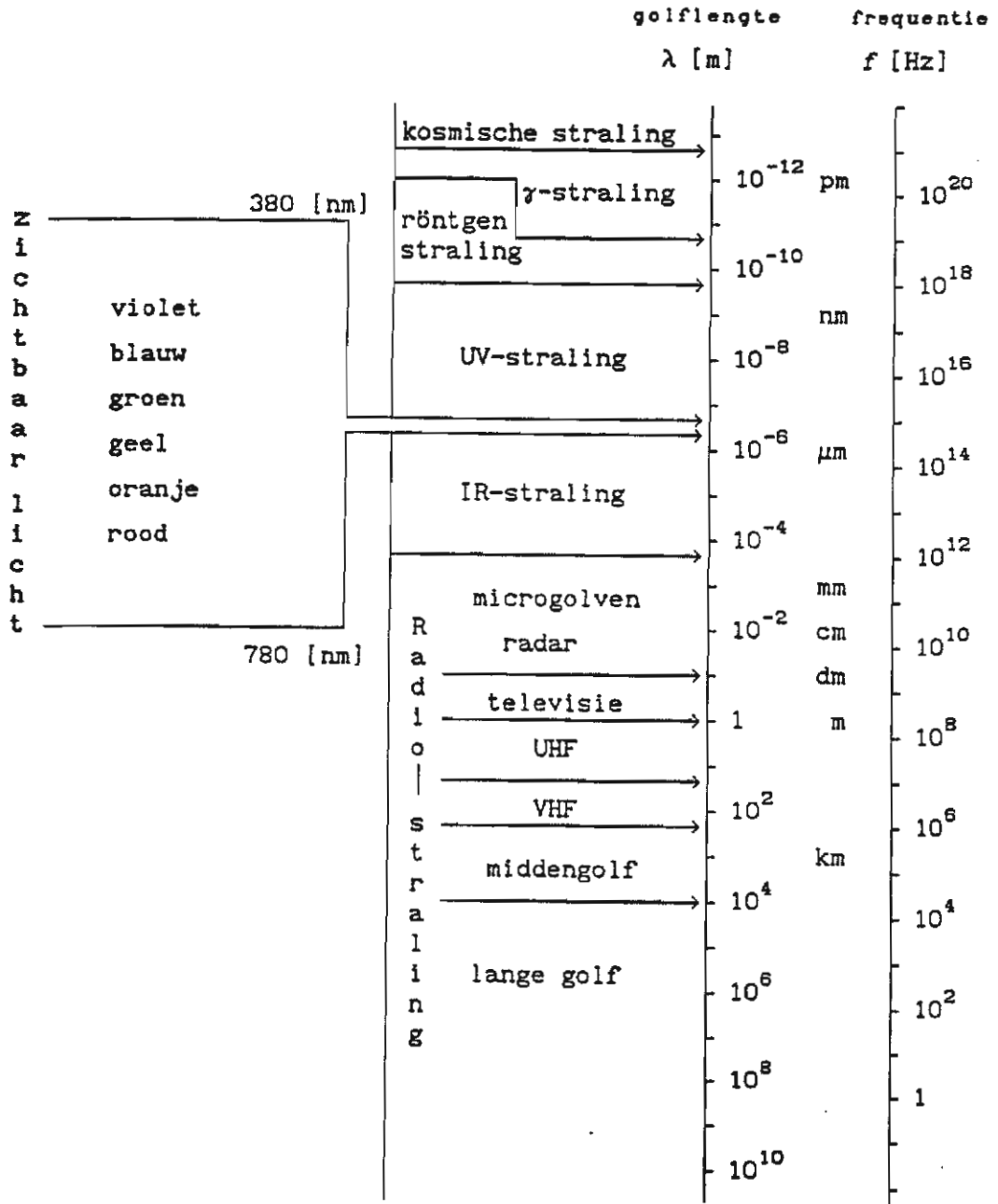
Tabel I: Het elektro-magnetisch spectrum

Stralingssoort	Golflengte	Frequentie (orde van grootte)	Bron
Radiogolven	1 km	10^5 Hz	Zendantenne
FM/TV	1 m	10^8 Hz	Zendantenne
Radar	1 cm	10^8 Hz	Radarschotel
Infra Rood (I.R.)	0,8-100 m	10^{12} - 10^{14} Hz	Zon, radiator, mens
Zichtbaar licht	380-780 nm	10^{15} Hz	Zon, fluorescentiebuis
Ultra Violet (U.V.)	0,1-350 nm	10^{16}	Zon, zonnebank
Röntgenstraling	$<10^{-10}$ m	$> 10^{19}$ Hz	Rö-buis, atoomkernen

■ De energetische eigenschappen zouden we ook in termen van de elektro-magnetische straling kunnen behandelen; we zullen het echter meer fenomenologisch benaderen: gericht op het effect dat de straling heeft op het menselijk waarneemingsvermogen, voor zover van interesse voor het vakgebied van de Bouwfysica.

■ De zonnestraling bestaat ongeveer voor 50% uit infra-rode (I.R-) straling, voor 48% uit licht (zichtbare straling) en voor 2% uit Ultra-Violette (U.V.-) straling. De I.R.-straling is de straling die we met

LICHT- EN STRALINGSGROOTHEDEN

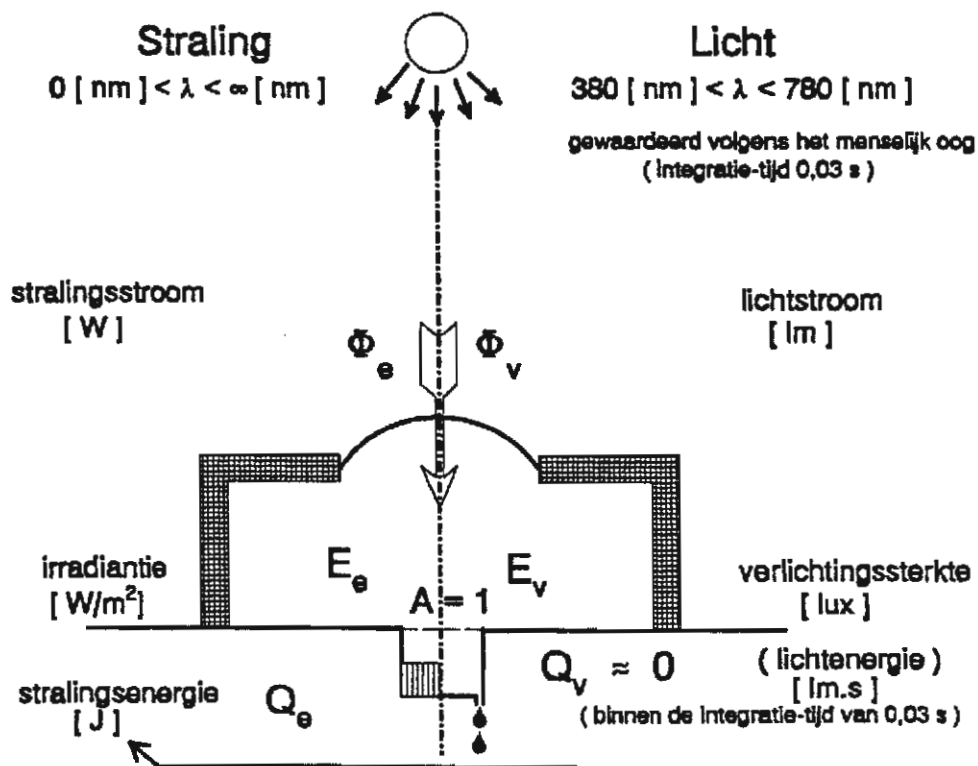


Het elektro-magnetisch spectrum

de huid als warmte voelen; licht is de straling die we met het oog zien; en de U.V.-straling is de straling die de huid bruint of verbrandt.

2.3. GROOTHEDEN EN EENHEDEN

De stralingsgrootheden en lichtgrootheden die we in het volgende zullen behandelen, vertonen qua mathematische vorm grote gelijkenis; de nadruk die de verlichtingskunde en de klimaatbeheersing op een en ander leggen, is echter totaal verschillend.



- De gebruikte eenheden zijn volgens het Internationale Eenheden Systeem (SI-eenheden).

2.3.1. LICHTHOEVEELHEID EN STRALINGSENERGIE

■ We hebben al gezien: naarmate de zon langer in een kamer schijnt, wordt het er warmer. Om dit te kwantificeren hebben we een grootheid nodig die zegt hoeveel warmte er binnen is gekomen: de *stralingsenergie* (symbool: Q_s ; eenheid: joule, J). Deze grootheid is van belang voor beschouwingen over het binnenklimaat van gebouwen. Bovendien verzamelt (accumuleert) het gebouw de toegevoerde stralingsenergie.

■ De gelijksoortige lichtgrootheid is de *licht(-stralings-)energie* (symbool: Q_l) (soms *lichthoeveelheid*). In de bouwfysica wordt deze grootheid niet gebruikt, omdat deze grootheid voor ons visuele waarnemen geen betekenis heeft: Als we in een dagverlichte kamer zitten wordt het er niet almaar lichter; de integratietijd (vgl. accumulatievermogen) van het oog is slechts 0,03 s. (In fotografische toepassingen is de lichtenergie wel van belang).

2.3.2. LICHTSTROOM EN STRALINGSSTROOM

■ Voor de helderheidsindruk van een ruimte maakt het wel uit hoeveel lichtenergie er net binnen de integratietijd binnenstroomt. De hoeveelheid lichtenergie per tijdseenheid – de *lichtstroom* – is van belang. Hoe groter deze *lichtstroom* (symbool: Φ_l ; eenheid: lumen, lm), hoe lichter het in het vertrek is.

■ De overeenkomstige grootheid voor straling is de *stralingsstroom* (symbool: Φ_s ; eenheid: watt, W). De stralingsstroom is de hoeveelheid stralingsenergie die per seconde door een willekeurig vlak heen treedt.

$$\Phi = \frac{Q}{\text{tijd}}$$

2.3.3. VERLICHTINGSSTERKTE EN IRRADIANTIE

■ Vaak is het handig niet een willekeurig vlak in beschouwing te nemen, maar een eenheid van oppervlak (de vierkante meter) en aan te geven hoeveel licht daar per tijdseenheid doorheen valt: de lichtstroom per oppervlakte-eenheid. We maken nu onderscheid tussen twee situaties, gezien vanuit het oppervlak (besproken in deze en de volgende paragraaf).

We spreken over de *verlichtingssterkte* (symbool: E_v ; eenheid: lux, lx), als de lichtstroom op een oppervlak valt.

$$E = \frac{\Phi}{A}$$

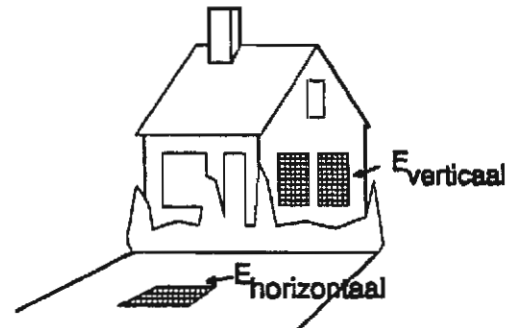
■ Als het ontvangend oppervlak horizontaal is, dan spreken we over de horizontale verlichtingssterkte. De verlichtingssterkte op een verticaal oppervlak is de verticale verlichtingssterkte.

■ De overeenkomstige grootte voor straling is de *irradiantie* (symbool: E_e ; eenheid: $W.m^{-2}$).

• Let op: De verlichtingssterkte wordt hier gedefinieerd als een lichtstroom per eenheid van oppervlak, we spreken echter over de verlichtingssterkte in een *punt* van een oppervlak. Het gaat dus om de lichtstroom naar een klein oppervlakte-elementje ΔA rond dat punt.

$$E = \frac{\Delta\Phi}{\Delta A}$$

Pas als de lichtstroom gelijkmatig over een groter oppervlak is verdeeld, geeft middeling over dat grotere oppervlak eenzelfde resultaat.



Tabel II: Voorbeelden van waarden van verlichtingssterkten

zonnige zomerdag	60.000-100.000 lx
sombere zomerdag	20.000 lx
sombere winterdag	3000 lx
kantoorverlichting	400-800 lx
nacht (volle maan)	0,25 lx

PRAKTIJKVOORBEELDEN

• EEN WERKTAFEL (1,20 M X 0,75 M) WORDT VERLICHT MET EEN VERLICHTINGSNIVEAU VAN 475 LUX. HOE GROOT IS DE LICHTSTROOM DIE OP HET TAFELBLAD VALT?

$$\begin{aligned} \Phi &= E \cdot A \\ &= 475 \cdot 1,20 \cdot 0,75 \\ &= 4,28 \cdot 10^2 \text{ lumen} \end{aligned}$$

• OP DE WERKTAFEL WORDT EEN TIJDSCHRIFT GELEGD. DE VERLICHTINGSSITUATIE DOOR KUNST- EN DAGLICHT BLIJFT ONVERANDERD. HOE GROOT IS DE VERLICHTINGSSTERKTE OP HET TIJDSCHRIFT? DE LICHTSTROOM NAAR HET TAFELBLAD VERANDERT NIET. DE VERLICHTINGSSTERKTE OP HET TIJDSCHRIFT ZAL DAN DEZELFDE ZIJN ALS OP HET TAFELBLAD.

2.3.4. LICHT- EN STRALINGSEMITTANTIE

■ Indien de lichtstroom uit een oppervlak komt spreken we over emittantie. De grootheid wordt weliswaar niet zo vaak gebruikt, maar is een goed hulpmiddel in de berekeningen. Zo kan een stralings- of lichtstroom op een reëel oppervlak vallen en daar gereflecteerd worden. Bij diffuse reflectie wordt het licht naar alle kanten weerkaatst. Ook bij gemengde reflectie (diffuse en spiegelende reflectie) kan het interessant zijn te weten hoeveel licht in een halfruimte (hemisfeer of halve bol) door een oppervlak totaal wordt uitgezonden. De *lichtemittantie* (symbool: M_v ; eenheid: lumen.m^{-2} , lm.m^{-2}) geeft nu aan welke lichtstroom door zo'n vlak per oppervlakte-eenheid wordt uitgestraald.

■ De overeenkomstige stralingsgrootheid is de *stralingsemittantie* (symbool: M_e ; eenheid: W.m^{-2}).

• Hier is een conceptueel probleem, probeer dat duidelijk te krijgen. Verlichtingssterkte is een "dichtheid" van lichtstroom *vallend op* een object, en is niet echt te zien. Pas als het object het licht reflecteert (dus een zekere *emittantie* heeft) is het mogelijk, dat het object voor ons zichtbaar wordt. De emittantie is de dichtheid van het totaal aan lichtstroom, dat een vlak in alle richtingen van een hemisfeer *uitzendt*. (zie ook "luminantie" 2.6.1)

2.4. STRALINGSWETTEN

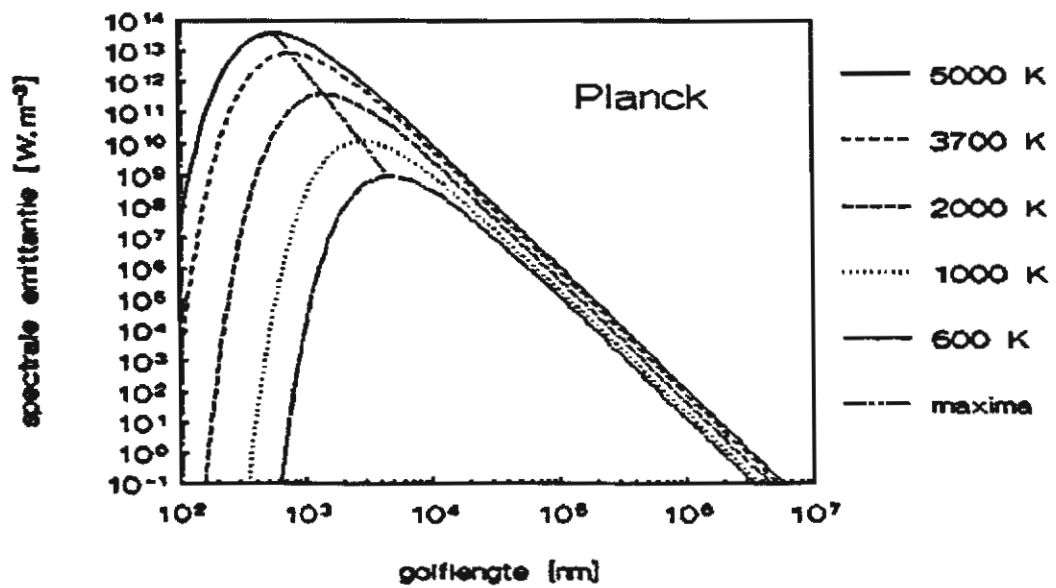
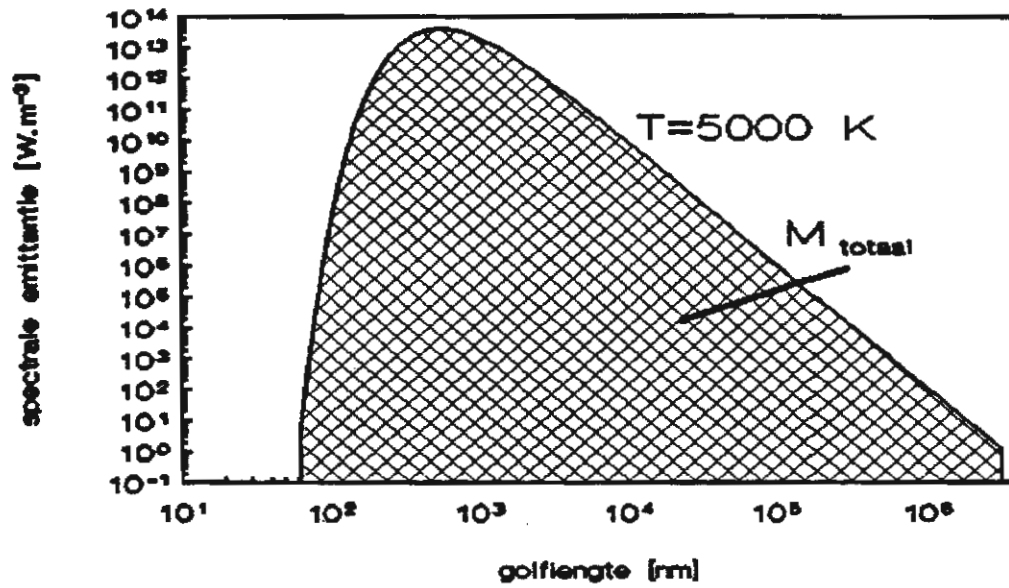
Een elektrische kookplaat, die wordt aangezet, zal een hogere temperatuur krijgen dan de omgeving. Naarmate de temperatuur hoger wordt voel je er meer warmte vanaf stralen: de stralingsemittantie neemt toe. Als de kookplaat zeer heet kon worden, zou hij zelfs van kleur veranderen.

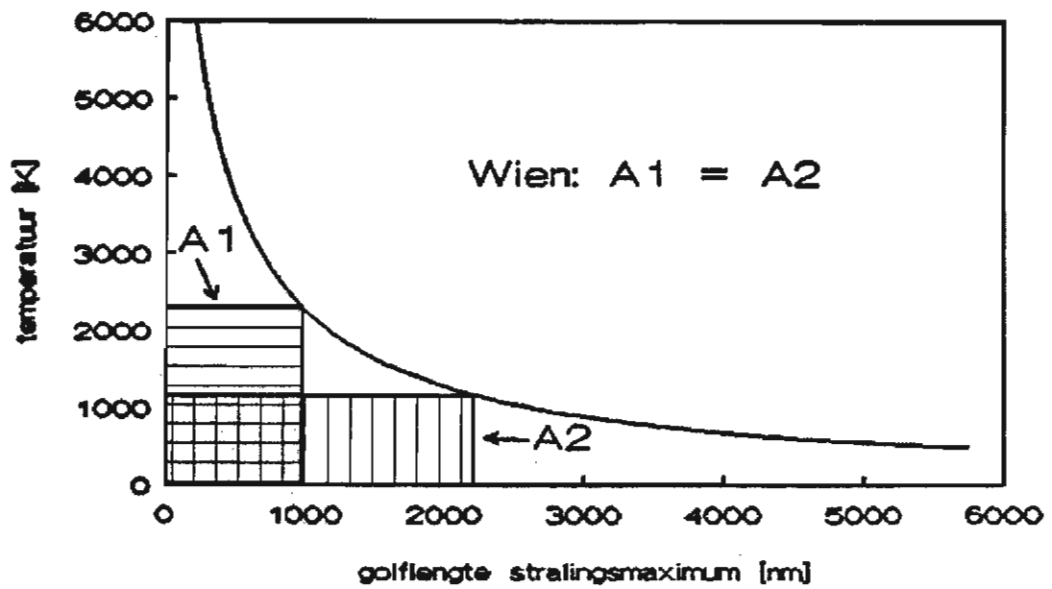
■ Dit lukt beter met de gloeispiraal van een gloeilamp: als daaraan meer energie in een bepaalde tijd wordt toegevoerd, verkleurt de gloeidraad van donkerrood via lichtrood, geelrood, geel naar uiteindelijk wit.

Er zijn twee punten op te merken, ten eerste:

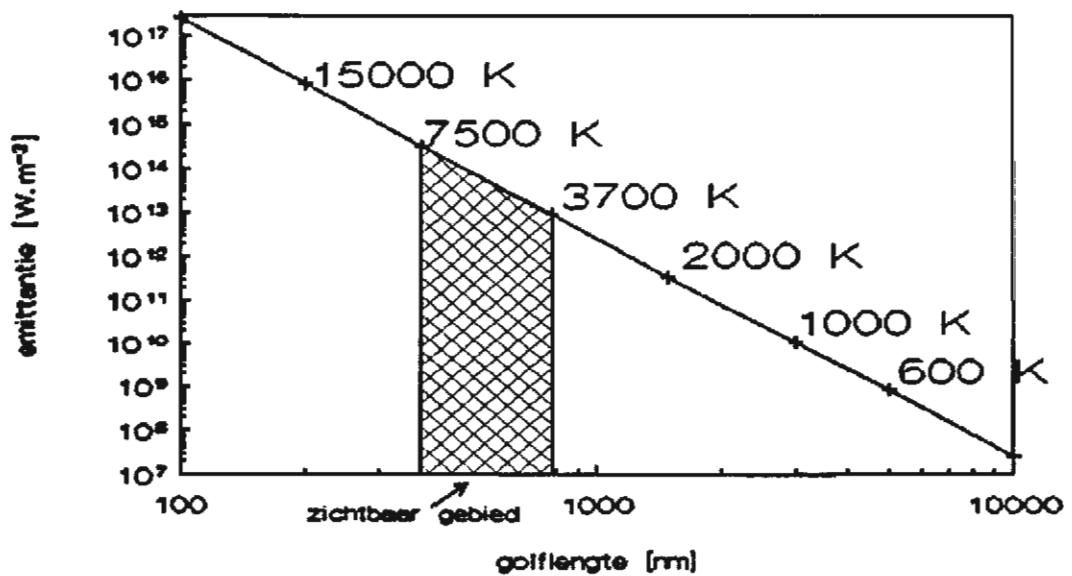
■ Het golflengtegebied, waar veel straling wordt geëmitteerd, verschuift naar kortere golflengten,

wet van Planck





spectrale emittantie
in stralingsmaximum



dus hier van het infrarood naar het zichtbare deel van het E.M.-spectrum.

Dit is de Verschuivingswet van Wien. In formulevorm, met λ de golflengte van het stralingsmaximum en T de absolute temperatuur:

$$\lambda \cdot T = \text{constant}$$

■ Ten tweede neemt de totale emittantie van E.M.-straling toe naarmate de temperatuur van het object hoger is. Dit is de wet van Stefan-Boltzmann. In formulevorm:

$$M_{\text{total}} = \sigma T^4$$

De constante van Stefan-Boltzmann $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ [W.m⁻².K⁻⁴]

■ Beide wetten zijn een uitvloeisel van de algemenere stralingswet van Planck, die aangeeft hoeveel straling per tijdseenheid door een object (per m²) in een klein golflengtegebied wordt uitgezonden. Voor elke temperatuur ontstaat een curve als geschetst. Verticaal staat de spectrale emittantie uitgezet. De curve voor een hogere temperatuur ligt volledig boven die voor een lagere temperatuur. Bij elke temperatuur boven het absolute nulpunt is er (een beetje) straling.

Tabel III: Het E.M.-spectrum tussen U.V. en I.R. geeft per golflengtegebied een andere kleurindruk

Infra Rood	
Rood	circa 650 nm
Oranje	circa 600 nm
Geel	circa 575 nm
Groen	circa 520 nm
Blauw	circa 450 nm
Violet	circa 380 nm
Ultra Violet	

• We kunnen voorwerpen in onze omgeving zien, omdat het licht dat deze voorwerpen reflecteren of zelf uitzenden, ons oog bereikt. Volgens de wet van Planck zendt een voorwerp zelf voor ons oog zichtbare straling (dus licht) uit als het voorwerp een zekere temperatuur overschrijdt. Voorbeelden zijn de gloeiende roetdeeltjes in een kaarsvlam of de gloeidraad van een gloeilamp. Ook de kleur van het uitgezonden licht hangt hiermee samen; hoe hoger de temperatuur hoe witter het licht. Het licht van een gewone gloeilamp is geler dan dat van een halogeen-gloeilamp. De gloeidraad van een halogeen-gloeilamp is heter dan die van een gewone gloeilamp. Men kan met behulp van de temperatuur de lichtkleur van lichtbronnen karakteriseren.

2.5. ENERGETISCHE VERSUS LICHTGROOTHEDEN

■ In het voorgaande is al gesproken over het feit dat een object zichtbaar is, als er licht van het object het oog bereikt en er een contrast, een helderheidsverschil, met de omgeving is. Welnu, een soldeerbout op een stuk wit papier is voor iedereen, ook achter in de zaal, goed zichtbaar. Nemen we nu als maat voor het contrast de verhouding tussen de lichtemittanties van het witte papier en de soldeerbout, dan blijkt deze verhouding ca. 8 te zijn.

Ook voor de stralingsemittantie kunnen we deze verhouding opmaken. De temperatuur van de soldeerbout is ongeveer 250 C. De emittantie is dan

$$M_{\text{soldb.}} = 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot (250 + 273)^4 = 4000 \text{ W.m}^{-2}$$

Voor de omgeving geldt

$$M_{\text{omg.}} = 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 300^4 = 460 \text{ W.m}^{-2}$$

Merk op dat de verhouding tussen deze stralingsemittanties van dezelfde orde is als de verhouding tussen de lichtemittanties. Kan echter iemand achter in de zaal zeggen of de soldeerbout aan is? Neen! Pas als het object voldoende dichtbij is kun je de stralingswarmte op de huid voelen: de irradiantie op de huid is dan waarneembaar.

■ Blijkbaar is de irradiantie op de huid van een zo klein, ver verwijderd voorwerp niet voldoende groot. Pas als het voorwerp ten opzichte van de huid voldoende ruimte inneemt, voelen we de warmtestraling.

Merkwaardig is ook dat de straling van bijvoorbeeld de afzonderlijke leden van een radiator al niet meer te voelen is als onze huid slechts op enige afstand van de radiator is: alleen de totale stralingsstroom op het huidoppervlak telt.

■ Voor wat betreft de *visuele* waarneming van de omgeving is de *ruimtelijke verdeling* van de lichtemittantie wel van belang. Met het oog is zeer gedifferentieerd na te gaan uit welke richting de lichtstraling komt: we kunnen de soldeerbout ook achter in de zaal zien.

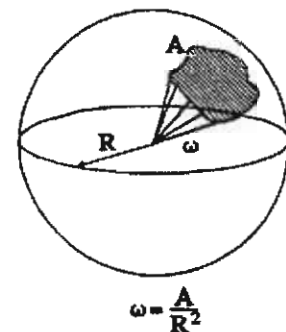
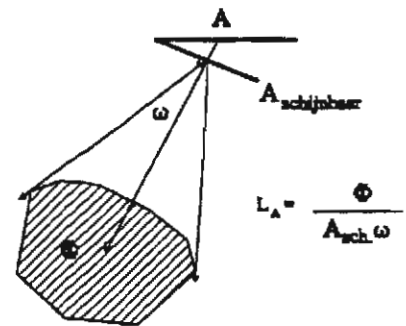
2.6. NOG ENKELE LICHTGROOTHEDEN

2.6.1. LUMINANTIE, RUIMTEHOEK

■ De soldeerbout is van grote afstand wel zichtbaar maar niet voelbaar, hoewel het "contrast" van dezelfde orde van grootte is. Voor de warmtegevoelbaarheid is het meer de irradiantie die telt: een verschil van 25 à 50 W.m⁻² (stralings-asymmetrie) is voelbaar.

■ Het oog neemt straling die uit *verschillende* delen van de ruimte komt, afzonderlijk waar. Het kan een raster, of glans, of spiegeling zien. De visuele waarneming kan dus gebruik maken van licht door een oppervlak in de richting van het oog binnen een klein deel van de ruimte (een 'ruimtehoekje') uitgezonden.

■ De lichtemittantie geeft dan te weinig informatie, want de emittantie zegt alleen iets over de grootte van de *totale* lichtstroom in alle richtingen van de stralen van een halve bol. Juist in de richting van het oog kan wel net geen licht worden uitgestraald. Men zou willen weten hoeveel licht door welk deel van de omgeving *in de richting van dat deel van de ruimte* waar het oog zich bevindt, wordt uitgezonden.



■ Om nu de lichtstroom die een object in een zekere richting uitzendt te karakteriseren, wordt de *luminantie* (symbool: L_v ; eenheid: $\text{lumen.ster}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ of, zoals later blijkt, meer gebruikelijk cd.m^{-2}) ingevoerd. Het is de lichtstroom in een bepaalde richting per eenheid van ruimtehoek, en betrokken op het oppervlak van het object dat vanuit die richting zichtbaar is. Dit oppervlak wordt ook wel *schijnbaar oppervlak* genoemd. (Voorbeeld: het schijnbaar oppervlak van een bol is een cirkel, van een piramide van opzij gezien een driehoek).

■ De ruimtehoek is dat deel van de ruimte dat door een vanuit een punt uitwaaiende bundel – rechthoekige – stralen wordt bestreken. Het doorsneden oppervlak loodrecht op de bundelrichting wordt groter naarmate het verder van de oorsprong af ligt. De verhouding tussen het oppervlak van de bundeldoorsnede en het kwadraat van de afstand tot de oorsprong van de bundel is constant. De grootte van zo'n "ruimtehoek" wordt aangegeven door de verhouding tussen het oppervlak uitgesneden uit een *bol om de oorsprong van de stralenbundel* en het kwadraat van de straal van die bol (beide in SI-lengte-eenheden). Merk op dat de grootte van de *ruimtehoek* (symbool: ω of Ω ; eenheid: *steradiaal*) wordt berekend uit een verhouding van SI-lengte-eenheden (de ruimtehoek lijkt dimensieloos, toch is het zinvol de steradiaal als 'echte' dimensie te gebruiken). Voor de berekening van de grootte van kleine ruimtehoeken mag je het boloppervlak vaak benaderen door een plat vlak.

■ In plaats van luminantie wordt ook wel helderheid gezegd; wij zullen echter onderscheid maken. *Helderheid is de visuele indruk* die ontstaat door een luminantie. De helderheid is wat je ziet (er is geen eenheid!), de luminantie is wat je kunt meten.

PRAKTIJKVOORBEELDEN

- WELK OPPERVLAK BESTRIJKT EEN RUIMTEHOEK VAN 0,03 STERADIAAL OP EEN AFSTAND VAN 145 CM?

$$A = 0,03 \cdot 145^2 = 631 \text{ cm}^2$$

DUS ONGEVEER HET OPPERVLAK VAN EEN BLADZIJDE A-4.

- WELKE RUIMTEHOEK BESLAAT HET OPPERVLAK VAN EEN HALVE BOL (STRAAL R), GEZIEN VANUIT HET MIDDELPUNT?

$$\begin{aligned} A_{\text{halve bol}} &= 2\pi R^2 \\ \omega_{\text{halve bol}} &= \frac{2\pi R^2}{R^2} \\ &= 2\pi \text{ steradiaal} \end{aligned}$$

- EEN OPPERVLAK (10 CM²) ZENDT IN EEN RICHTING LOODRECHT OP HET OPPERVLAK, BINNEN EEN RUIMTEHOEK (UITGAANDE VAN HET OPPERVLAK) VAN 0,05 STERADIAAL EEN LICHTSTROOM UIT MET EEN GROOTTE VAN 100 LUMEN. HOE GROOT IS DE LUMINANTIE VAN HET OPPERVLAK IN EEN RICHTING BINNEN DE RUIMTEHOEK?

$$L = \frac{100}{10 \cdot 10^{-4} \cdot 0,05} = 2,0 \cdot 10^8 \frac{\text{cd}}{\text{m}^2}$$

- ONDER EEN HOEK VAN 60 MET DE NORMAAL VAN BOVENBEDOELD OPPERVLAK MEET MEN BINNEN EEN RUIMTEHOEK (UITGAANDE VAN HET OPPERVLAK) VAN 0,05 STERADIAAL OOK EEN LICHTSTROOM VAN 100 LUMEN. HOE GROOT IS DE LUMINANTIE IN DEZE RICHTING? HET SCHIJNBAAR OPPERVLAK IS:

$$\begin{aligned} A_{\text{schijnbaar}} &= A_0 \cdot \cos \alpha \\ &= 10 \cdot \cos 60^\circ = 5,0 \text{ cm}^2 \end{aligned}$$

EN DE LUMINANTIE VAN HET VLAK ONDER EEN HOEK VAN 60 IS:

$$L = \frac{100}{10 \cdot 10^{-4} \cdot \cos 60^\circ \cdot 0,05} = 4,0 \cdot 10^8 \frac{\text{cd}}{\text{m}^2}$$

■ De overeenkomstige stralingsgrootte is de *radiantie* (symbool: L_e ; eenheid: $W \cdot ster^{-1} \cdot m^{-2}$). Deze grootte is niet zo van belang voor de beschrijving van het binnenklimaat.

2.6.2. LICHTSTERKTE

■ De luminantie geeft aan hoe groot de lichtstroom in een bepaald georiënteerde ruimtehoek, uitgezonden door het schijnbare oppervlak van een licht"bron", is. Indien het licht-uitzende oppervlak oneindig klein wordt, is de grootte luminantie zinloos. De lichtstroom die door dat zeer kleine oppervlakje (of beter puntbron) per ruimtehoek wordt uitgezonden, noemen we de *lichtsterkte* (symbool: I_v ; eenheid: *candela*, *cd*) van de puntbron.

• Let op: de lichtsterkte is de lichtstroom per ruimtehoek, dus de eenheid had ook kunnen zijn: 'lumen per steradiaal', *cd* is echter de internationaal gebruikelijke eenheid. Daarom wordt ook voor de luminantie (lichtsterkte per schijnbaar oppervlak) de eenheid $cd \cdot m^{-2}$ gehanteerd.

■ De overeenkomstige stralingsgrootte, de *stralingssterkte of intensiteit* (symbool: I_e ; eenheid: $W \cdot ster^{-1}$) wordt nauwelijks gebruikt. Soms vind je de benaming intensiteit voor wat wij hier irradiantie hebben genoemd.

■ Ter onderscheid van de energetische en visuele grootheden is aan de symbolen de index *e* of *v* toegevoegd; indien verwarring uitgesloten is, wordt de index weggelaten.

PRAKTIJKVOORBEELDEN

• EEN LICHTBRON HANGT LOODRECHT BOVEN EEN A-4-PAPIER OP EEN HOOGTE VAN 145 CM. DE DIRECTE VERLICHTINGSSTERKTE OP HET PAPIER TEN GEVOLGE VAN DEZE LICHTBRON IS 350 LUX. HOE GROOT IS DE LICHTSTERKTE VAN DE LICHTBRON IN DE RICHTING VAN HET A-4-PAPIER?

DE 350 LUX ONTSTAAT DOORDAT OP HET A-4-PAPIER (21x29 CM²) EEN LICHTSTROOM VALT MET DE GROOTTE:

$$0,21 \cdot 0,29 \cdot 350 = 21,3 \text{ lumen}$$

TEN OPZICHTE VAN DE LICHTBRON NEEMT HET A-4-PAPIER EEN RUIMTEHOEK IN (DE AFSTAND IS RELATIEF GROOT, DUS MOGEN WE HET VLAKE OPPERVLAK NEMEN):

$$\frac{0,21 \cdot 0,29}{1,45^2} = 0,029 \text{ steradiaal}$$

DE LICHTBRON STRAALT OOK BINNEN DEZE RUIMTEHOEK DE 21,3 LUMEN UIT. DE GEVRAAGDE LICHTSTERKTE IS:

$$\frac{21,3}{0,029} = 735 \text{ cd}$$

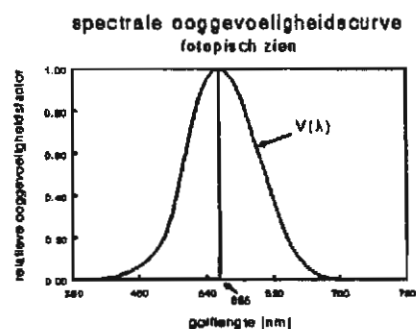
2.7. DE ENERGIE-INHOUD VAN LICHT

2.7.1. SPECTRALE OOGGEVOELIGHEID

In het begin is gesteld dat zowel warmtestraling (I.R.-straling) als licht speciale soorten E.M.-straling zijn; met beide soorten straling wordt energie getransporteerd. Men zou dus kunnen volstaan met de energetische eenheden ook voor licht toe te passen.

Toch is gekozen voor afzonderlijke lichteenheden; enerzijds omdat men lichthoeveelheden al in de eerste helft van de 18^e eeuw mat, toen de kennis van de E.M.-straling nog moest worden ontwikkeld, anderzijds omdat in de licht-eenheden enigszins een visueel effect is verdisconteerd. Vergelijk met een analoog probleem: van een irradiantie van 10 W m^{-2} U.V.-straling wordt je huid bruin of verbrandt zelfs als de bestraling lang genoeg duurt; tengevolge van een irradiantie van 10 W m^{-2} I.R.-straling wordt de huid beslist niet bruin. Het oog herkent geen van beide stralingssoorten als licht; het oog is niet 'visueel' gevoelig voor U.V.- en I.R.-straling. (U.V.-straling kan het oog wel al snel beschadigen!)

■ Ook binnen het zichtbare gebied is het oog niet even gevoelig voor elke golflengte (kleur). Een watt geel-groen licht lijkt veel helderder dan een watt violet licht. Het menselijk oog is gevoeliger voor geel-groene straling dan voor rode of violette straling. De precieze gevoeligheidswaarden voor de verschillende golflengten zijn internationaal vastgelegd in de *relatieve spectrale ooggevoeligheidscurve*, kortweg V_λ -curve. Het maximum van de V_λ -curve ligt bij 555 nm.

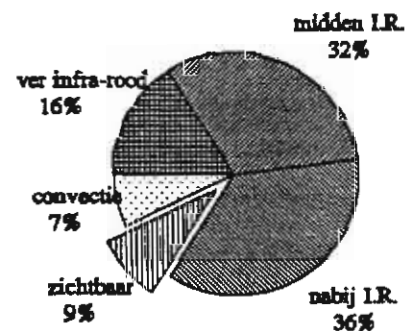


2.7.2. MAXIMALE SPECTRALE LICHTEFFICIËNTIE

- Het eenhedensysteem dat rekening houdt met het spectrale gevoeligheidsverloop van het oog is het hierboven besproken systeem voor lichteenheden. Er is gekozen voor een praktische volgorde, waardoor de natuurkundig-formele volgorde op zijn kop komt te staan.
- Van oudsher is in de verlichtingskunde de lichtsterkte de primaire grootheid met thans als eenheid de candela. Sinds 1979 is de candela gedefinieerd als de lichtsterkte van een bron die alleen straling uitzendt bij een golflengte van 555 nm met een energiestroom per steradiaal van 1/683 watt. Door middel van deze definitie en de V_λ -curve is de energie-inhoud van de zichtbare straling, het licht, ook bij andere golflengten te berekenen.
- Het getal 683 lm.W^{-1} is de maximale spectrale lichtefficiëntie. Ga zelf na dat de eenheid lm.W^{-1} is.

2.7.3. LICHTRENDEMENT

■ Praktisch gezien zijn we vaak meer geïnteresseerd in hoeveel energie het kost om licht te maken: bijvoorbeeld welk lampvermogen van een gloeilamp is nodig om een werktafel te verlichten?. Die lamp zendt behalve licht ook I.R.-straling uit, en verliest warmte aan de omringende lucht en het armatuur. Per watt vermogen van de gloeilamp zal zeker geen 683 lumen aan lichtstroom worden uitgezonden; het blijkt vaak niet meer dan 15 lumen te zijn. We zeggen dan, dat het *lichtrendement* (symbool: R ; eenheid: lm.W^{-1} , 'lumen per watt') van een gloeilamp ongeveer 15 lm/W is.

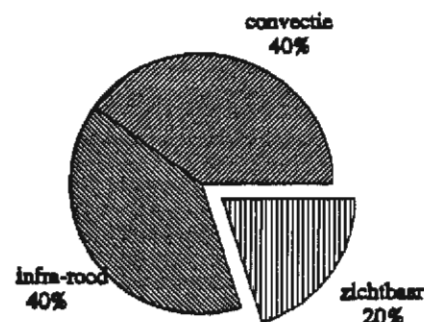


Energiebalans gloeilamp

Tabel IV: Het lichtrendement van enkele lichtbronnen

gloeilamp 60 W	12 lm/W
gloeilamp 150 W	15 lm/W
halogeenlamp	22 lm/W
compacte fluorescentielamp SL 18	50 lm/W
fluorescentielamp TL 36W kleur 83	¶ 90 lm/W
kwikjodide lamp	¶ 85 lm/W
natriumlamp (oranje)	¶ 135-170 lm/W
natriumlamp (geel-wit)	¶ 80-125 lm/W
daglicht	circa 115 lm/W

¶: exclusief watt-verliezen van het Voor-Schakel-Apparaat (10% à 20% van het lampvermogen)



Energiebalans fluorescentielamp

PRAKTIJKEVOORBEELD

- HOE GROOT IS DE LICHTSTROOM DIE EEN 150 W GLOEILAMP UITZENDT?

$$150 \cdot 15 = 2,25 \cdot 10^3 \text{ lumen}$$

- HOEVEEL COMPACTE FLUORESCENTIELAMPEN (SL 18) HEB JE NODIG OM EENZELFDE LICHTSTROOM TE VERKRIJGEN?

EEN LAMP ZENDT $18 \times 50 = 900$ LUMEN UIT. DUS DRIE ($2250/900=2,5$) SL-LAMPEN LEVEREN ZELFS MEER DAN DE GEVRAAGDE LICHTSTROOM, EN VOOR MAAR $\frac{1}{3}$ VAN HET VERMOGEN DAT DE GLOEILAMP GEBRUIKTE!

2.7.4. ENERGIEVERBRUIK EN LAMPKOSTEN

■ Je ziet dat de verlichting van een vertrek ook consequenties heeft voor de grootte van de warmte-toevoer naar de ruimte, en dus voor de thermische behaaglijkheid. De keuze voor een bepaalde licht-bron heeft dus een energetisch aspect.

Met het energieverbruik van een lichtbron is ook een kostenaspect verbonden. De goedkoopste lichtbron is namelijk de gloeilamp, de andere in de tabel genoemde zijn (aanzienlijk) duurder. Je zult daarom de aanschafkosten van de lichtbron af moeten wegen tegen de energiekosten over de gebruiksduur van de lichtbron. In ruimten waar gedurende lange tijd kunstverlichting nodig is, zul

- In dit dictaat berekenen we de lichtstroom met relatief eenvoudige methode. Later blijkt dat de nuttige lichtstroom op een complexe manier van verscheidene factoren afhankelijk is, zo ook de grootte van de warmtebelasting door het verlichtingssysteem; we noemen hier:

- de gebruikte lichtbronnen
- de voorschakelapparatuur (VSA)
- het systeemrendement, bepaald door de lichtsterkteverdeling, het armatuurrendement, de ruimte-afwerking, de ruimte-vorm.
- het verlichtingsniveau
- de bedrijfsduur.

je dan ook veelal voor lichtbronnen kiezen met een hoog lichtrendement.

- Een verlichtingsinstallatie geeft een warmtetoevoer naar de verlichte ruimte.

De warmtetoevoer per seconde kan worden berekend volgens:

$$\sum_{\text{alle lichtbronnen}} \frac{\text{lichtstroom van de lichtbron}}{\text{lichtrendement}}$$

DOELSTELLINGEN HOOFDSTUK II

Na het doorwerken van dit hoofdstuk dien je:

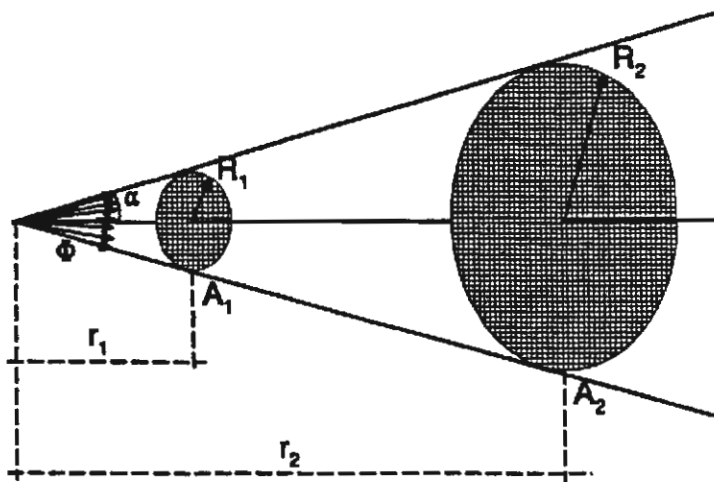
- *het begrip straling te kunnen definiëren, enkele stralingssoorten te kunnen noemen en een globale kennis te hebben van het ontstaan van de straling;*
 - *het verschil te kunnen aangeven in het menselijk waarnemen van zichtbare en warmte straling en overige stralingssoorten; te weten hoe de energie van enkele belangrijke lichtbronnen wordt afgestaan (energiebalans);*
 - *van de licht en stralingsgrootheden*
 - *de bijbehorende SI-eenheden te kennen;*
 - *de formules, die de onderlinge relaties van deze grootheden in algemene zin weergeven, te kunnen reproduceren en interpreteren;*
 - *voorbeelden van situaties (uit je dagelijkse omgeving) te kunnen noemen waaruit blijkt welke rol elk van de grootheden speelt;*
 - *de relaties tussen deze grootheden op diverse eenvoudige lichtsituaties te kunnen toepassen, waarbij ieder van de grootheden als onbekende kan optreden. Ontleen de situatie aan je eigen omgeving!*
 - *de energetische consequenties van licht en lichtbronnen te kennen, ook in relatie met de gebruiksduur;*
-

3. BEREKENING VAN DE DIRECTE VERLICHTINGSSTERKTE

3.1. INVERSE-KWADRATEN WET

■ Licht plant zich rechtlijnig voort. Daardoor zal een bundel licht (een lichtstroom) die vanuit een punt (een lichtpunt) de ruimte ingaat een steeds groter oppervlak doorsnijden. Eenvoudige geometrische overwegingen laten zien dat dit oppervlak toeneemt met het kwadraat van de afstand tot het lichtpunt. De verlichtingssterkte Φ/A neemt dus af met het kwadraat van de afstand r .

$$E(\cdot) \frac{1}{r^2}$$



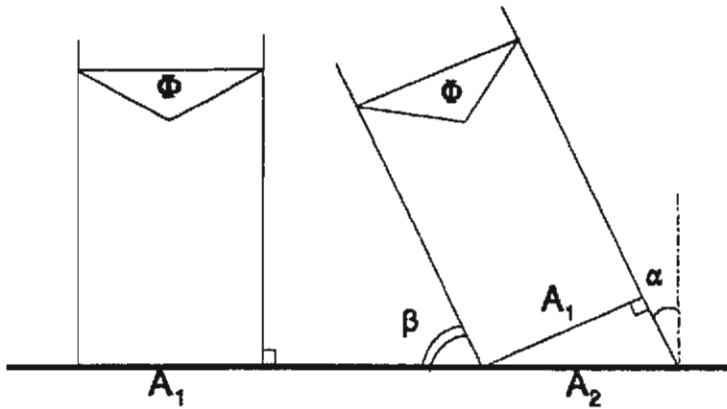
$$\tan \alpha = \frac{R_1}{r_1} = \frac{R_2}{r_2}$$

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\frac{\Phi}{A_1}}{\frac{\Phi}{A_2}} = \frac{A_2}{A_1} = \frac{\pi \cdot R_2^2}{\pi \cdot R_1^2} = \frac{r_2^2}{r_1^2}$$

dus: afstand neemt toe
 → oppervlak neemt toe
 → lichtstroom blijft gelijk
 → verlichtingssterkte neemt kwadratisch af.

■ Als de lichtbundel langs het oppervlak scheert, komt er geen licht op het oppervlak. Een lichtbundel treft het kleinste oppervlak als de bundel loodrecht op het oppervlak invalt. De verlichtingssterkte Φ/A is dan dus maximaal, en neemt af met $\sin \beta$, waarin β de hoek tussen de invallende bundel en het oppervlak (90 bij loodrechte inval).

$$E(\cdot) = \frac{1}{r^2} \sin \beta$$



$$\sin \beta = \frac{A_1}{A_2}$$

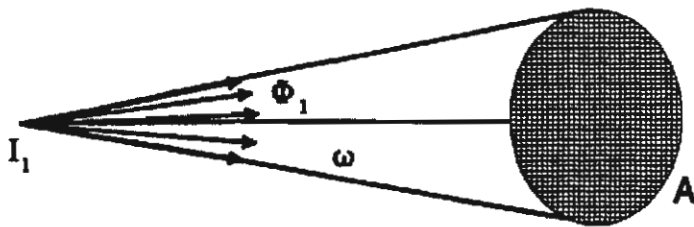
$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\frac{\Phi}{A_1}}{\frac{\Phi \cdot \sin \beta}{A_2}} = \frac{1}{\cos \alpha}$$

dus: hoek van inval wijkt af van normaal
 → oppervlak wordt groter
 → verlichtingssterkte neemt af

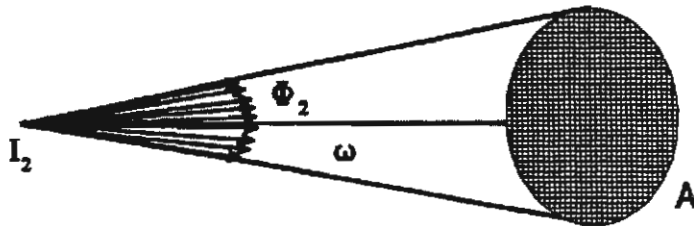
■ Naarmate de lichtstroom in de uitwaaiende lichtbundel (dit wordt aangeduid met de lichtsterkte) groter is, is ook de verlichtingssterkte op een door de lichtbundel doorsneden vlak groter. Nu kunnen we voor het verband tussen de verlichtingssterkte op een oppervlak en de lichtsterkte van de puntlichtbron schrijven

$$E = \frac{I}{r^2} \sin \beta$$

Inverse-kwadraten wet

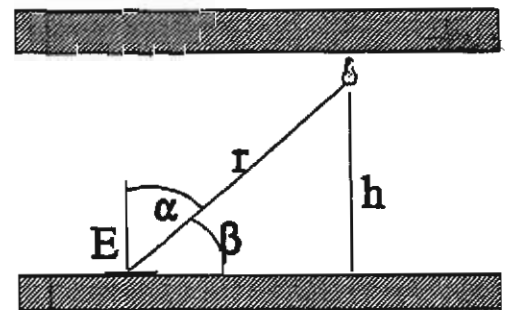


$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\frac{I_1 \cdot \omega}{A}}{\frac{I_2 \cdot \omega}{A}} = \frac{I_1}{I_2}$$



dus: lichtsterkte wordt groter
 → lichtstroom naar oppervlak groter
 → verlichtingssterkte groter

• Let op: vaak wordt de oriëntatie ten opzichte van de normaal op het vlak aangegeven door middel van de hoek $\alpha = 90 - \beta$; de term $\sin \beta$ wordt dan $\cos \alpha$.



■ Vaak wil men weten hoe groot de directe verlichtingssterkte is, in verscheidene punten op een vloer ten gevolge van een lichtbron aan het plafond. De afstand r in de inverse-kwadraten wet is voor elk punt anders, en om deze afstand te berekenen heeft men de hoek α en de hoogte h van het plafond boven de vloer nodig. We kunnen daarom ook de hoogte h direct in de inverse-kwadraten wet opnemen.

$$E = \frac{I}{h^2} \sin^3 \beta$$

PRAKTIJKVOORBEELD

DE VERLICHTINGSSTERKTE IN EEN PUNT (A) OP EEN TAFEL RECHT ONDER EEN PUNTBRON (HOOGTE BOVEN TAFEL 60 CM) IS GELIJK AAN DE VERLICHTINGSSTERKTE OP TAFEL (PUNT B) OP EEN AFSTAND VAN 45 CM VAN PUNT A. HOE VERHOUDEN ZICH DE LICHTSTERKTEN VAN DE PUNTBRON IN DE AANGEGEVEN RICHTINGEN?

DE RICHTING NAAR PUNT B TEN OPZICHTE VAN DE NORMAAL IS:

$$\alpha = \arctan \frac{45}{60} = 36,87^\circ$$

DUS:

$$\frac{K(0^\circ)}{K(36,87^\circ)} = \cos^3 36,87^\circ = 0,51$$

3.1.1. LICHTSTROOM VAN EEN ALZIJDIG EN HOMOGEEN STRALENDE PUNTBRON

■ Een puntvormige lichtbron, die naar alle kanten gelijkmatig licht uitstraalt, heeft een naar alle richtingen gelijke lichtsterkte. Als de lichtsterkte van een puntbron onafhankelijk van de beschouwde richting is, kunnen we met behulp van de inverse-kwadraten wet de uitgezonden lichtstroom berekenen. Stel je voor: de puntbron ligt in het middelpunt van een bol met een straal R van 1 meter. De lichtsterkte van de puntbron is I [cd]. Met behulp van de inverse-kwadraten wet is nu de verlichtingssterkte op de binnenkant van de bol te berekenen. (Veronderstel dat alle licht wordt geabsorbeerd in het boloppervlak). Elke straal uitgezonden door de puntbron valt loodrecht in op het boloppervlak, zodat $\sin \beta = 1$.

Dan is

$$E_{bolopp.} = \frac{I}{R^2} = I \quad [lux]$$

Het oppervlak van de bol is

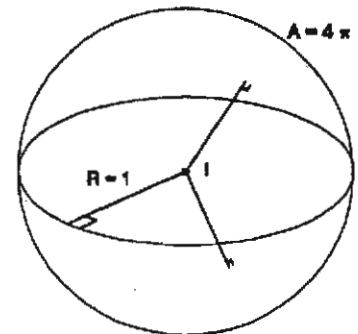
$$A_{bolopp.} = 4 \pi R^2 = 4 \pi \quad [m^2]$$

De lichtstroom op het boloppervlak is dan

$$\Phi_{bol} = E_{bolopp.} \cdot A_{bolopp.} = 4 \pi \cdot I \quad [lumen]$$

Al het licht, dat door de puntbron wordt uitgezonden, treft het boloppervlak, zodat de lichtstroom op het boloppervlak ook de uitgezonden lichtstroom van de puntbron is

$$\Phi_{puntbron} = \Phi_{bol}$$



$$A_{bol} = 4 \pi R^2 = 4 \pi \quad [m^2]$$

$$E = \frac{I \cdot \sin 90^\circ}{1^2} = I \quad [lux]$$

$$\Phi_{bol} = E \cdot A = 4 \pi I \quad [lm]$$

- Dus de lichtstroom uit een puntbron met alzijdig constante lichtsterkte is

$$\Phi_{I=\text{constant}} = 4\pi I \quad [\text{lumen}]$$

- Bedenk ook dat de lichtsterkte I de lichtstroom per ruimtehoek is. De lichtstroom van een puntbron met een constante lichtsterkte kan dan ook geschreven worden als

$$\Phi_{I=\text{constant}} = I \cdot \Omega_{\text{bol}}$$

- Hieruit volgt dat de ruimtehoek Ω_{bol} die wordt ingenomen door een volledige bol rondom een puntbron, de grootte van 4π steradiaal heeft. Overigens volgt dit ook rechtstreeks uit de definitie van ruimtehoek (ga dat zelf na).

3.2. PRAKTIJKPROBLEMEN

1. Hoeveel licht valt er per seconde door een lichtkap in een dak. De afmetingen zijn: lengte 4,0 meter, breedte 3,0 meter. De kap is witgekalkt, de transmissiefactor is 0,60. De buitenverlichtingssterkte op het horizontale dakvlak is 15000 lux.

2. Verlichting op een tennisveld voor recreatief tennis. Het speelveld heeft een lengte 23,80 m en een breedte 11,0 m.

A: lichtmast 6,0 m hoog en 2,0 m uit de rand van het veld.

B₁: richtpunt hart van de bundel 4,5 m en 6,0 m van de zij- respectievelijk achterlijn.

In de vier masten wordt een halogeenlamp in een armatuur bevestigd. Van het licht uit de halogeenlamp bereikt 43% het speelveld. Het lichtrendement van de halogeenlamp is 22,7 lm/W. De

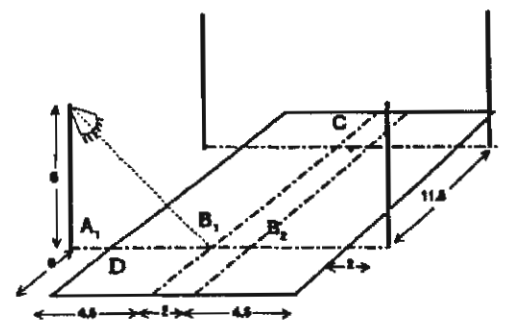
PRAKTIJKVOORBEELD

- EEN PUNTVORMIGE LICHTBRON ZENDT ALZIJDIG EN GELIJKMATIG LICHT UIT. DE TOTALE LICHTSTROOM IS 720 LUMEN. HOE GROOT IS DE LICHTSTERKTE?

$$I = \frac{720}{4\pi} = 57,3 \text{ cd}$$

- DE LICHTSTROOM UIT DE LICHTBRON WORDT DOOR EEN VLAKE SPIEGEL VERLIESLOOS EN GELIJKMATIG GECONCENTREERD IN EEN HEMISFEER (HALVE BOL). HOE GROOT IS NU DE LICHTSTERKTE? DE RUIMTE HOEK VAN EEN HEMISFEER IS 2π STERADIAAL.

$$I = \frac{720}{2\pi} = 115 \text{ cd}$$



- De gemiddelde verlichtingssterkte over het speelveld is hier gegeven. Er wordt dus

verlichtingssterkte op het speelveld is gemiddeld 225 lux.

- a. Hoe groot is het vermogen van de halogeenlamp in elk van de masten?

De verlichtingssterkte in punt B₁ is 250 lux. (Veronderstel dat alleen lichtmast A₁ bijdraagt tot deze verlichtingssterkte).

- b. Hoe groot is de lichtsterkte in het hart van de bundel?

aangenomen dat in elk punt van het speelveld dezelfde verlichtingssterkte heerst; dit gegeven verwaarloost de variaties van het verlichtingsniveau in de afzonderlijke punten van het veld.

Als de verlichtingssterkte in een punt van het speelveld gegeven is kan met de inverse-kwadraten wet de lichtsterkte naar dat punt worden berekend, en omgekeerd.

Tabel V: Doorlatingsfactoren voor materialen in de gebouwde omgeving

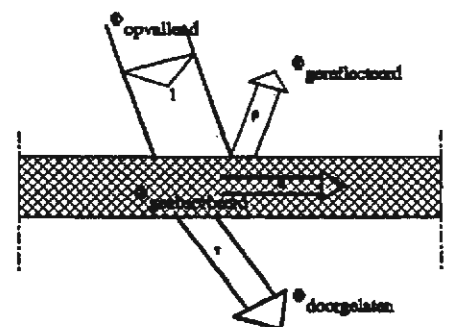
helder glas	0,92	helder dubbel glas	0,7-0,84
melkglas	0,10-0,38	draadglas	0,53-0,7
gematteerd glas, gladde zijde	0,63-0,78	acrylglas, wit diffuus	0,55-0,78
gematteerd glas, matte zijde	0,82-0,88	glazen bouwstenen	0,30-0,60
wit perkament	0,35-0,55	dun katoen of zijde	0,3-0,7
donkere gordijnstof 0-7% open	0,05	donkere gordijnstof 25-50% open	0,39
lichte gordijnstof 0-7% open	0,17	lichte gordijnstof 25-50% open	0,58

3.2.1. DOORLATING-, REFLECTIE- EN ABSORPTIEFACTOREN

■ In probleem 1 heb je te maken met een lichtstroom die op de lichtkap valt, en daar ten dele wordt doorgelaten. Welk deel van het licht er wordt doorgelaten geeft de transmissiefactor τ aan. Er geldt

$$\phi_{\text{doorgelaten}} = \tau \cdot \phi_{\text{opvallend}}$$

De witkalk op de lichtkap maakt het materiaal *niet-doorzichtig*, maar het laat wel licht door. We noemen de lichtkap *translucent*. Het oppervlak van dit materiaal heeft zelf een luminantie (zie § 3.3.5).



- Let op: een materiaal dat wel doorzichtig is noemen we *transparant*: we zien de luminantie van het achter het doorzichtige materiaal liggende oppervlak (houd rekening met de transmissiefactor τ).

Tabel VI: Reflectiefactoren voor materialen in de gebouwde omgeving

wit pleisterwerk (nieuw, droog)	0,70-0,80	reflectal	0,85-0,88
wit pleisterwerk (oud)	0,30-0,60	zilver (gepolijst)	0,88-0,93
witte verf	0,65-0,85	zilver achter spiegelglas	0,80-0,88
aluminiumverf	0,60-0,75	aluminium (gepolijst)	0,65-0,75
beton (nieuw)	0,40-0,50	aluminium (mat)	0,55-0,60
beton (oud)	0,05-0,15	roestvrij staal	0,55-0,65
baksteen (nieuw)	0,10-0,30	chrom (mat)	0,52-0,55
baksteen (oud)	0,05-0,15	chrom (gepolijst)	0,60-0,70
kalksteen	0,35-0,55	blik	0,68-0,70
houtvezelplaat (crème, nieuw)	0,50-0,60	wit papier	0,7-0,8
houtvezelplaat (crème, oud)	0,30-0,40	sneeuw (vers)	0,75
licht berken- en esdoornhout	0,55-0,65	sneeuw (oud)	0,65
licht gelakt eikenhout	0,40-0,50	aaarde (vochtig)	0,07
donker gelakt eikenhout, mahonie- en notenhout	0,15-0,40	gras (donkergroen)	0,06
donkerbruine gordijnen	0,10-0,20	vegetatie (gemiddelde)	0,25
zwart fluweel	0,005-0,04	menselijke huid (niet gebruikt)	0,45
draadglas	0,15-0,27	helder glas	0,08
acrylglas, wit diffuus	0,17-0,41	gematteerd glas, matte zijde	0,07-0,08
melkglas	0,4-0,6	gematteerd glas, gladde zijde	0,12-0,2
licht grijs	0,60	wit perkament	0,35-0,5
middel grijs	0,35	licht bruin	0,50
donker grijs	0,20	middel bruin	0,25
licht geel	0,70	donker bruin	0,08
middel geel	0,50	licht rood	0,35
donker geel	0,30	middel rood	0,20
licht groen	0,60	donker rood	0,10
middel groen	0,30	licht blauw	0,50
donker groen	0,12	middel blauw	0,20
		donker blauw	0,05

- De witgekalkte lichtkap zal ook een deel van het opvallende licht reflecteren. Deze fractie wordt aangegeven met de reflectiefactor ρ

$$\phi_{\text{gereflecteerd}} = \rho \cdot \phi_{\text{opvallend}}$$

- Evenzo kan er een deel van het licht in de lichtkap worden geabsorbeerd, en daar omgezet in warmte. Deze fractie wordt aangegeven door de absorptiefactor α

$$\phi_{\text{geabsorbeerd}} = \alpha \cdot \phi_{\text{opvallend}}$$

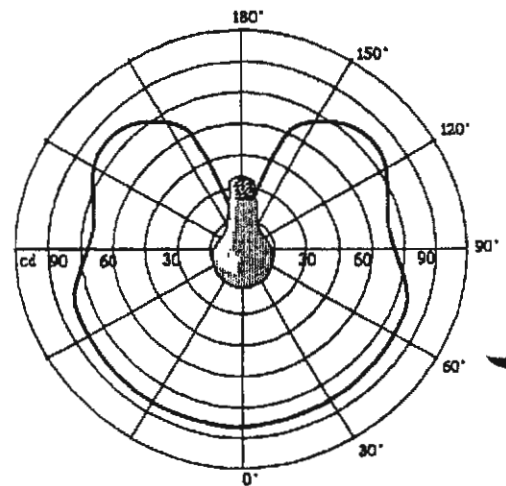
- Eenvoudig is in te zien dat de som van deze factoren gelijk 1 moet zijn
Deze factoren worden ook wel als een percentage

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

gegeven; de som is dan natuurlijk 100%.

3.2.2. LICHTSTERKTEDIAGRAM

- Het tweede onderdeel van probleem 2 (§ 3.2) laat uit de verlichtingssterkte op grote afstand van de lichtbron de lichtsterkte berekenen. Dit is ook de enige methode om lichtsterkte te meten, omdat dan pas een lichtbron de puntbron voldoende benadert; we komen daar later op terug. Indien over het hele speelveld geen andere lichtbijdrage dan van één mast kwam, zou uit de meting van de verlichtingssterkte in een aantal punten op het speelveld een indruk van de lichtsterkten van het armatuur in die richtingen worden verkregen. Omgekeerd kun je, als van een armatuur/lamp-combinatie de lichtsterkte wordt gegeven, de verlichtingssterkte op een vlak berekenen.

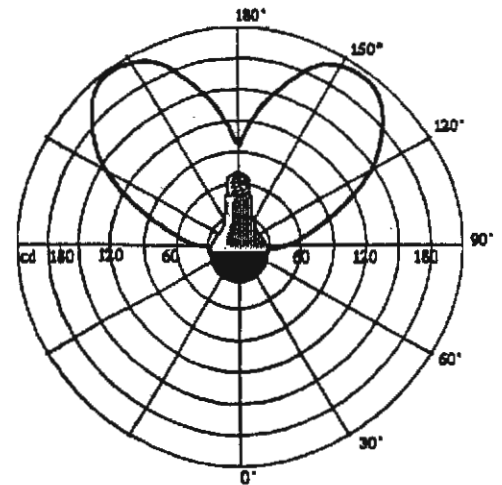


Polair lichtsterktediagram van een gloeilamp; lichtsterkte genormeerd op 1000 lm lamplichtstroom.

■ Fabrikanten van armaturen verstrekken veelal deze informatie in een lichtsterkediagram. Hierin staat uitgezet in één of twee vlakken door het armatuur, hoe groot de lichtsterkte is in een richting ten opzichte van de hoofdrichting waarin licht wordt uitgestraald (bijvoorbeeld het hart van de bundel).

De gebruikte schaalverdeling voor de lichtsterkte wisselt nogal eens: Men kan vermelden: de absolute lichtsterkte; de relatieve lichtsterkte ten opzichte van het maximum van de lichtsterkte curve (in fracties of procenten); of de lichtsterkte genormeerd op 1000 lumen van de lamplichtstroom.

■ De lichtsterkte per 1000 lumen is erg inzichtelijk, omdat het lichtsterkediagram dan informatie geeft over een armatuur waarin verschillende lampen (van gelijke afmeting en ongelijke lichtstroom) kunnen worden gemonteerd.



Polair lichtsterkediagram van een kopspiegellamp; lichtsterkte genormeerd op 1000 lm lamplichtstroom.

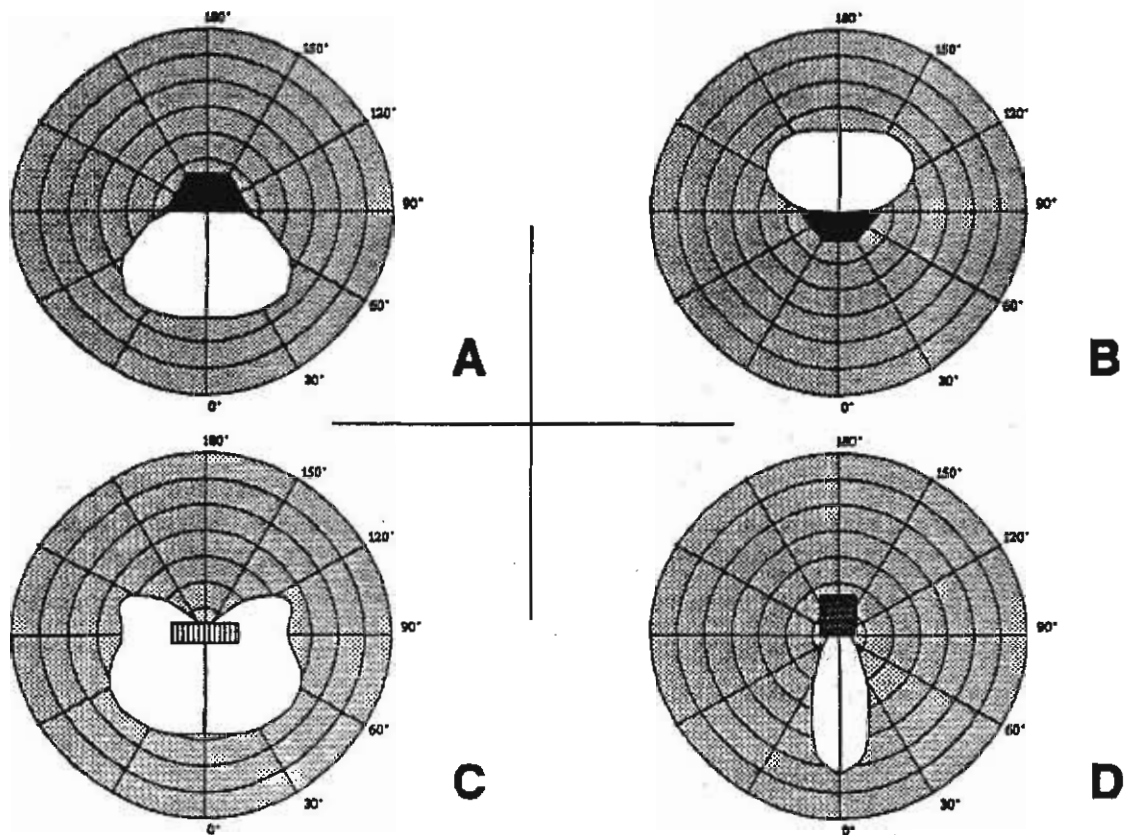
Bijvoorbeeld: Een bepaald armatuur voor gloeilampen van 15 tot 100 W heeft een lichtsterkte van 500 cd per 1000 lumen in het hart van de bundel. Dan betekent dit voor een 15 W gloeilamp met een lichtstroom van 120 lumen (of 0,120 kilolumen, klm) een lichtsterkte van

$$0,120 \times 500 = 60,0 \text{ cd}$$

Idem voor een gloeilamp van 60 W met een lichtstroom van 730 lumen (0,730 klm) is dat een lichtsterkte van

$$0,730 \times 500 = 365 \text{ cd}$$

■ Bij de uitwerking van een lichtplan maak je een passende keuze over de verdeling van de helderheden — en dus ook de verlichtingssterkten — in de ruimte. Zoals in het voorbeeld van het tennisveld (§ 3.2 probleem 2) kun je uit de gewenste verlichtingssterkte op het speelveld besluiten hoe het



Polaire lichtsterktediagrammen. A: directe lichtverdeling; breedstralend. B: indirecte lichtverdeling. C: gemengde lichtverdeling; semi-direct. D: directe lichtverdeling; diep-stralend.

lichtsterktediagram van het gezochte verlichtingsarmatuur er dient uit te zien.

■ Aan de hand van de grootte van de lichtstroom naar beneden (lichtuitstralingsrichtingen $\leq 90^\circ$) en naar boven (lichtuitstralingsrichtingen $\geq 90^\circ$) is het gebruikelijk armaturen globaal in te delen als een armatuur met een:

- directe lichtstroomverdeling
- gemengde lichtstroomverdeling
- indirecte lichtstroomverdeling

Op grond van de vorm van de lichtsterkteverdeling zijn er vele typen te onderscheiden; we noemen hier breedstralende, diepstralende en asymmetrische armaturen.

DOELSTELLINGEN HOOFDSTUK III (1^{ste} DEEL)

Na het doorwerken van dit deel van het hoofdstuk dien je:

- *het begrip directe verlichtingssterkte te kunnen definiëren en enkele voorbeelden te kunnen geven, waarin de directe verlichtingssterkte de verlichtingssterkte is; geef ook een voorbeeld waarin dat niet het geval is;*
- *de inverse kwadraten wet te kennen en de componenten te kunnen benoemen;*
 - *de afleiding uit de geometrische overwegingen te kunnen geven;*
 - *verscheidene verschijningsvormen als één en dezelfde wet te herkennen;*
 - *situaties waarin de wet geldig is te kunnen beschrijven en herkennen (zoek ook een voorbeeld waarin de wet niet geldig is);*
 - *te weten wat de inverse kwadraten wet betekent voor de verdeling van het licht van puntbronnen (met betrekking tot lichtstroom, lichtsterkte en verlichtingssterkte) door de ruimte heen;*
- *de samenhang te kennen tussen lichtsterkte en lichtstroom stromend uit een puntbron in (delen van) de ruimte; het begrip ruimtehoek te kunnen gebruiken;*
- *de definitie van doorlating-, reflectie- en absorptie-factoren en de samenhang tussen deze factoren te kennen;*
 - *de betekenis van transparante en translucente (diffuse) doorlating te kennen en er voorbeelden van te kunnen geven;*
 - *de begrippen op eenvoudige praktische situaties te kunnen toepassen;*
- *verlichtingsmiddelen d.m.v. polair lichtsterktediagram en lichtstroomverdeling te kunnen karakteriseren;*
 - *enkele typen te kunnen noemen en herkennen en daarvan praktische voorbeelden te kunnen geven;*
- *een situatie met (bijna-) puntbronnen en directe verlichting te kunnen analyseren en daarin een (verlichtingskundige) grootte te kunnen berekenen;*

3.3. ALGEMENE VERLICHTINGSFORMULE

■ De inverse-kwadraten wet (§ 3.1) geldt voor een lichtbundel die wordt uitgezonden door een puntvormige lichtbron. Of voor lichtbronnen die, gezien vanuit het standpunt waar de verlichtingssterkte

berekend moet worden, erg klein zijn: een kleine ruimtehoek innemen, bijvoorbeeld een ster aan de hemel.

■ Veel bronnen van licht in de gebouwde omgeving zijn niet zo klein – of bevinden zich niet zo veraf – dat zij als puntvormig kunnen worden beschouwd.

Hoe berekenen we in zo'n geval de verlichtingssterkte?

Wel, we kunnen het grote licht-uitzendende oppervlak opdelen in zulke kleine partjes dat zij vrijwel puntvormig zijn, en op deze kleine partjes de inverse-kwadraten wet toepassen. De lichtsterkte van partje nummer 1 volgt uit de luminantie L_1 en het schijnbare oppervlak ΔA_1 , van dat partje volgens:

$$I_1 = L_1 \cdot \Delta A_1$$

De bijdrage tot de verlichtingssterkte (E_1) van partje 1 op een afstand R_1 is dan

$$E_1 = \frac{L_1 \Delta A_1}{R_1^2} \sin \beta_1$$

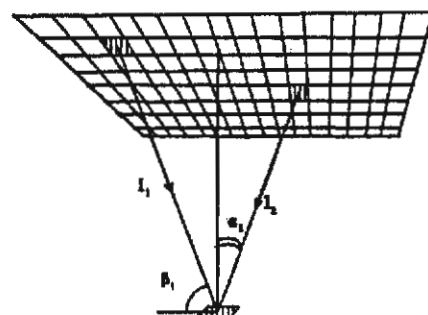
Als $\Delta A_1/R_1^2$ voldoende klein is, kunnen we voor deze verhouding een ruimtehoekje $\Delta \omega_1$ schrijven en wel

$$\Delta \omega_1 = \frac{\Delta A_1}{R_1^2}$$

Hiermee wordt de verlichtingssterkte van partje 1:

$$E_1 = L_1 \sin \beta_1 \Delta \omega_1$$

■ De ruimtehoek die de lichtbron met groot oppervlak inneemt, is dus nu verdeeld in kleine ruimtehoekjes. En de verlichtingssterkte van de



totale lichtbron is de som van alle bijdragen in de kleine ruimtehoekjes, dus

$$E_{\text{tot.}} = \sum_{\text{partjes}} L_j \sin \beta_j \Delta \omega_j$$

of als integraal, geïntegreerd over de ruimtehoek Ω die de lichtbron inneemt

$$E = \int_{\Omega} L \sin \beta \, d\omega$$

Algemene Verlichtingsformule

Met deze formule kan heel algemeen de verlichtingssterkte worden berekend.

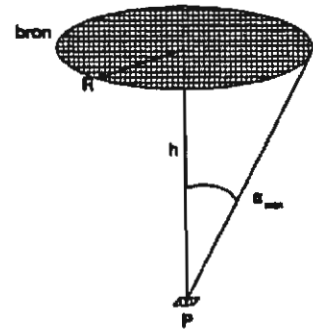
In de §§ 3.3.1 en 3.3.2 zien we voor een aantal bijzondere geometrieën een uitwerking van deze formule. Een grafische bepalingsmethode wordt in § 3.5 behandeld.

3.3.1. CIRKELVORMIGE LAMBERTSTRALER

■ De verlichtingssterkte in een punt P op een horizontaal vlak recht onder het midden van een cirkelvormige lichtbron met uniforme luminantie is met de algemene verlichtingsformule relatief eenvoudig te berekenen.

■ We veronderstellen dat de lichtbron een *Lambertstraler* is. Dit is een straler die de lichtstroom zó over de ruimte verdeelt, dat de luminantie van het stralend oppervlak onafhankelijk van de richting is, waarin het licht wordt uitgestraald. De luminantie van de lichtbron die vanuit het punt P gezien wordt, is dan ook onafhankelijk van de hoek α . De luminantie L mag dan buiten het integraal-teken worden gehaald.

De algemene verlichtingsformule is:



$$E_p = \int L \sin \beta \, d\omega$$

of voor de Lambertstraler in de figuur:

$$E_p = L \int_{\Omega_{\text{lichtbron}}} \cos \alpha \, d\omega$$

De bijdragen tot de verlichtingssterkte van partjes uit een ring rond het middelpunt van de lichtbron zijn gelijk (de invalshoek en de luminantie is voor elk partje dezelfde). De ruimtehoek door zo'n ring ten opzichte van P ingenomen, wordt gevonden uit de verhouding van het schijnbare ringoppervlak (gezien vanuit P) en het kwadraat van de afstand van de ring tot punt P.

Het schijnbare oppervlak van de ring is

$$2\pi R \cdot \Delta R_s$$

Dus:

$$\Delta \omega = \frac{2\pi R \cdot \Delta R_s}{r^2}$$

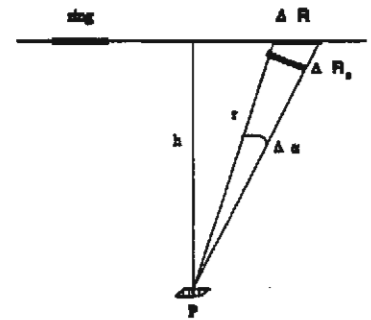
met $\Delta R_s = r \cdot \Delta \alpha$ en $\Delta \alpha$ in radialen wordt dit:

$$\Delta \omega = \frac{2\pi R}{r} \Delta \alpha$$

Verder is

$$\frac{R}{r} = \sin \alpha$$

Voor een schijf met straal R_{max} moet er worden geïntegreerd over ringen waarbij α loopt van nul tot α_{max} . Substitueren we dit in de algemene verlichtingsformule:



$$E_P = L \cdot 2\pi \int_0^{\alpha_{\max}} \sin \alpha \cdot \cos \alpha \, d\alpha$$

Integreren geeft:

$$E_P = 2\pi L \cdot \frac{1}{2} \sin^2 \alpha \Big|_0^{\alpha_{\max} = \arcsin \sqrt{\frac{R^2}{h^2 + R^2}}}$$

■ Dus de horizontale verlichtingssterkte in een punt P, recht onder een schijf (Lambertstraler) met straal R, op een afstand h is:

$$E_P = \pi L \frac{R^2}{h^2 + R^2}$$

Schijf met straal R

3.3.2. RECHTHOEKIGE LICHTBRONNEN

Iets ingewikkelder verloopt de integratie voor rechthoekige lichtbronnen. Voor ons zijn voorlopig alleen de resultaten van belang. We onderscheiden twee gevallen:

1. Het schijnbare oppervlak van de lichtbron staat loodrecht op het vlak waarin de verlichtingssterkte wordt berekend;
2. Het schijnbare oppervlak van de lichtbron ligt evenwijdig aan het vlak waarin de verlichtingssterkte wordt berekend.

■ Een voorbeeld van 2 is de berekening van de direct verlichtingssterkte op tafel ten gevolge van een rechthoekig dakraam (dak horizontaal), waar doorheen vanuit het punt op tafel een hemel met uniforme luminantie zichtbaar is. In dat geval

kunnen we de luminantie (van de lichtbron) gepositioneerd denken op de plaats van het raam.

■ Een voorbeeld van 1 is de berekening van de verlichtingssterkte op tafel ten gevolge van een rechthoekig raam in de gevel. Ook hier moet (opdat de gegeven formule geldig is) vanuit het punt op tafel (door het raam heen) een vlak met uniforme luminantie zichtbaar zijn.

■ **Rechthoekig raam in een gevel.**

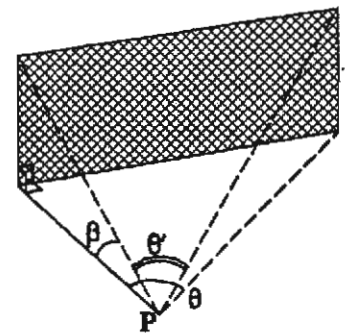
De horizontale verlichtingssterkte in een punt van een horizontaal vlak door de onderdorpel van het raam en op een rechte door het hoekpunt van het raam loodrecht op het gevelvlak is te berekenen uit:

$$E_{P_{hor}} = \frac{1}{2} \cdot L_{raam} \cdot [\theta - \theta' \cos \beta]$$

met

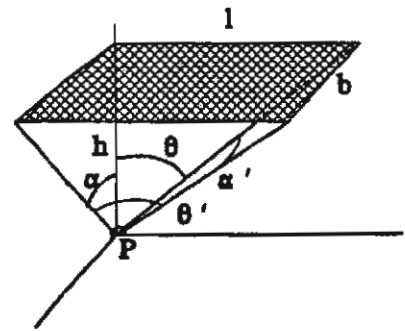
$$\theta' = \arctan [\cos \beta \cdot \tan \theta]$$

- Let op: neem de hoeken in radialen en meet de hoeken vanaf een vlak loodrecht op het raamvlak, zoals in de tekening. Bijdragen van raamvlakken op een andere plaats in de gevel moeten door herhaald toepassen van deze formule en sommeren (positief en negatief) worden berekend. Zie hierna.
- Let op: reken, als de tussenuitkomsten weinig verschillen, de tussenuitkomsten in voldoende decimalen uit.



■ **Rechthoekig raam in horizontaal dak.**

De horizontale verlichtingssterkte recht onder het hoekpunt van een raam in het horizontale dakvlak is te berekenen uit:



$$E_{P_{hor}} = \frac{1}{2} \cdot L_{raam} \left\{ \frac{b}{\sqrt{h^2 + b^2}} \cdot \arctan \frac{l}{\sqrt{h^2 + b^2}} + \frac{l}{\sqrt{l^2 + h^2}} \cdot \arctan \frac{b}{\sqrt{h^2 + l^2}} \right\}$$

Deze formule kunnen we ook schrijven in een hoeknotatie:

$$E_{P_{hor}} = \frac{1}{2} \cdot L_{raam} (\theta' \sin \alpha + \alpha' \sin \theta)$$

Met

$$\theta' = \arctan [\cos \alpha \cdot \tan \theta]$$

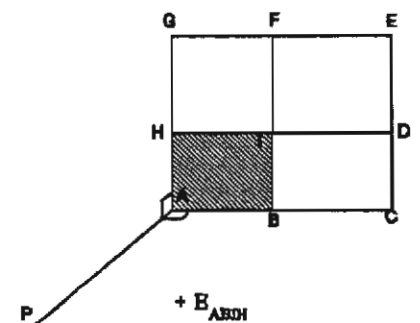
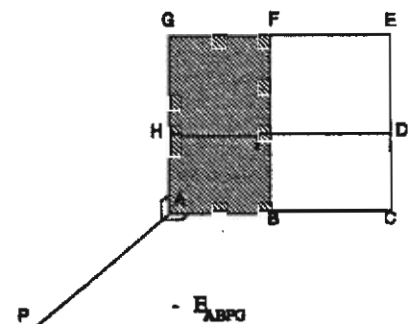
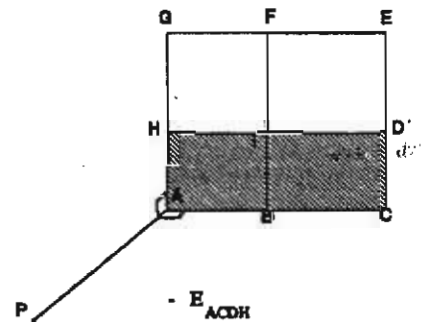
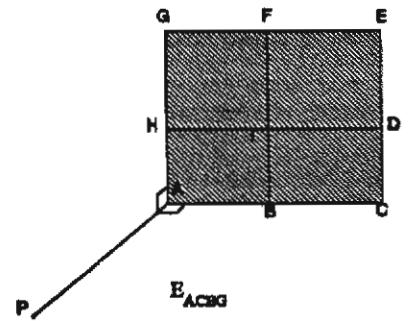
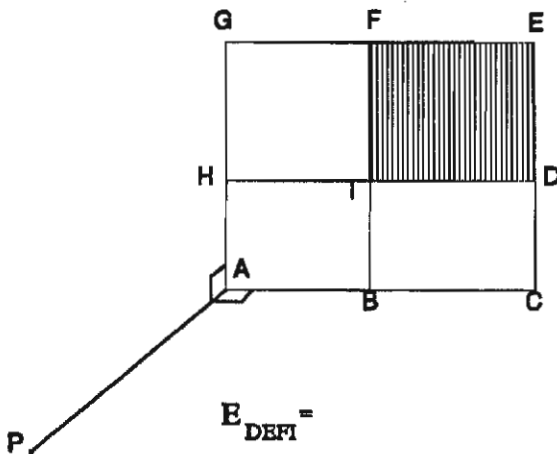
$$\alpha' = \arctan [\cos \theta \cdot \tan \alpha]$$

- Let op: neem de hoeken in radialen en meet de afstanden vanaf de loodlijn op het raamvlak door punt P. Bijdragen tot de verlichtingssterkte in P ten gevolge van daklichten op andere plaatsen in het dak, worden berekend door geschikte herhaalde sommatie (positief en negatief). Zie hierna.
- Let op: reken, als de tussenuitkomsten weinig verschillen, de tussenuitkomsten in voldoende decimalen uit.

■ Voorbeeld van de herhaalde sommatie.

Veronderstel dat we de horizontale verlichtingssterkte in P ten gevolge van de lichtopening DEFI, stralend volgens de Lambertstraler, willen berekenen. Deze bijdrage kunnen we opgebouwd denken uit de bijdrage van de rechthoek ACEG, waarvan afgetrokken de bijdrage van de rechthoeken ACDH en ABFG. De rechthoek ABIH wordt nu echter één maal "teveel" afgetrokken, dus deze moet er weer bij worden geteld. Dan is de gezochte verlichtingssterkte in P ten gevolge van DEFI:

$$E_{DEFI} = E_{ACEG} - E_{ACDH} - E_{ABFG} + E_{ABIH}$$



3.3.3. LICHTTOETREDING TOT DAGLICHTOPENINGEN

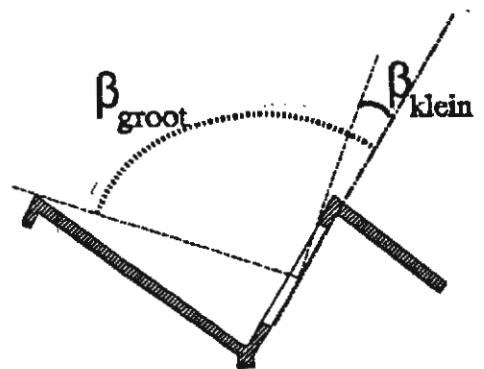
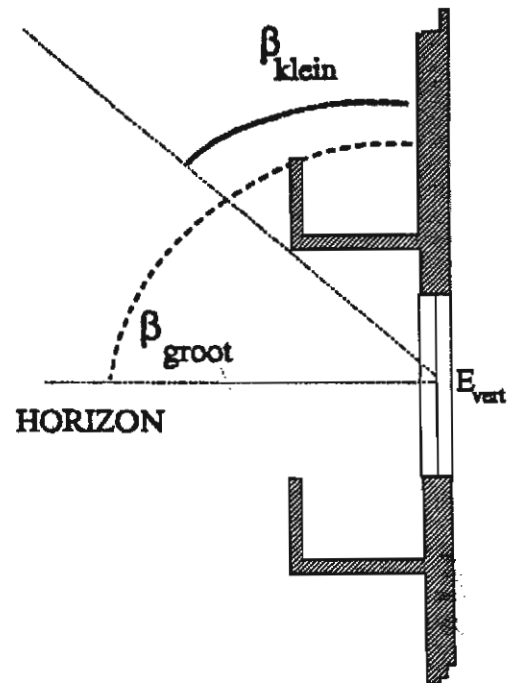
In een latere paragraaf bespreken we de verlichtingsregel, waarmee we de Totale Verlichtingssterkte in een ruimte kunnen berekenen. Voor een daglichtberekening met de verlichtingsregel moet je eerst de lichtstroom naar een daglichtopening weten. Met de formules uit § 3.3.2 kunnen we uitrekenen hoe groot de verlichtingssterkte op een raamvlak is, tengevolge van een deel van de hemel. Laten we het uitrekenen voor een verticaal raam onder een oneindig lange galerij. In dat geval zijn de hoeken θ gelijk aan π (90). De directe verlichtingssterkte veroorzaakt door een uniforme hemel-luminantie L_{Hemel} wordt dan:

$$E = L_{\text{hemel}} \cdot \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot [\cos \beta_{\text{klein}} - \cos \beta_{\text{groot}}]$$

E op vlak met belemmering

- Met deze formule kun je de verlichtingssterkte op willekeurig georiënteerde raamvlakken uitrekenen; dus voor het raamvlak in een monitor-dak, een shed-dak, etc. Reken dan de belemmeringshoeken vanaf het vlak, waarin de daglichtopeningen liggen (kies voor *beide* hoeken de richting òf linksom òf rechtsom), en neem het midden van de daglichtopening als referentiepunt.

- De lichtstroom op de daglichtopening zal niet volledig de achter-liggende ruimte binnentreden. Je moet rekening houden met de transmissieverliezen. Zie voor de transmissiefactor van verscheidene



E_direct op raamvlak

BEREKENING VAN DE DIRECTE VERLICHTINGSSTERKTE

lichtdoorlatende materialen de tabel bij § 3.2.1; daarbovenop komt nog een reductiefactor voor het verlies door vervuiling. De volgende tabel geeft enkele richtwaarden.

Tabel VII: Correctiefactor voor vervuiling van daglichtopeningen. Geldig voor een schoonmaakperiode van zes maanden

Ligging	Aard van de Werkzaamheden	Hellingshoek van het glas (gemeten t.o.v. de horizontaal)		
		90 - 75	60 - 45	30 - 0
Landelijk en Voorstedelijk gebied	schoon	0,9	0,85	0,8
	vuil	0,7	0,6	0,55
Woonwijk	schoon	0,8	0,75	0,7
	vuil	0,6	0,5	0,4
Industriegebied	schoon	0,7	0,6	0,55
	vuil	0,5	0,35	0,25

3.3.4. PRAKTIJKPROBLEMEN

3. Loodrecht onder het snijpunt van de diagonalen van de lichtkap uit probleem 1 wordt de verlichtingssterkte in het horizontale vlak gemeten. Men vindt 2500 lux. Er komt alleen licht rechtstreeks van het dakraam. De afstand tot het raamvlak is 3,11 m.

- a. Hoe groot is de luminantie van het wit-gekalkte daklicht?
- b. Bepaal de verhouding tussen de emittantie en de luminantie M/L van deze diffuus licht doorlatende opening.

4. Een hanglamp bestaat uit een opaal-witte cirkelvormige perspex schijf die aan de bovenzijde wordt verlicht door een 50 W halogeen-gloeilamp. De luminantie van de onderzijde van de perspex-schijf is 250 cd per m². De diameter van de schijf is 50 cm. De perspex schijf hangt horizontaal op een hoogte van 75 cm boven de tafel.

- a. Hoe groot bereken je de verlichtingssterkte op de tafel recht onder de perspex schijf, als je gebruik maakt van de inverse-kwadraten wet?
- b. Hoe juist lijkt je dit antwoord uit a?

3.3.5. VERBAND TUSSEN DE LUMINANTIE EN DE EMITTANTIE

■ De in probleem 3b gevonden verhouding tussen de emittantie en luminantie van een lichtuitstralend vlak is karakteristiek voor een Lambertstraler. Theoretisch is te bewijzen dat er geldt:

$$M = \pi \cdot L$$

Hoe de emittantie M ontstaat is niet zo van belang: het kan tengevolge van reflectie of transmissie (of beide) zijn. De emittantie van een reflecterend oppervlak volgt uit de verlichtingssterkte op dat oppervlak:

$$M = \rho \cdot E$$

■ De luminantie van zo'n diffuus, dus lamberts, reflecterend oppervlak is dan:

$$L = \frac{\rho \cdot E}{\pi}$$

Lambertstraler met reflectie ρ

• Sommige materialen laten licht door, en verstrooien het doorgelaten licht ook sterk (translucente materialen). De luminantie van zo'n plaat ten gevolge van de doorgelaten (transmissiefactor τ) lichtstroom is:

$$L = \frac{\tau \cdot E}{\pi}$$

Lambertstraler met transmissie τ

Dit verband passen we in de bouwfysica op de meeste bouwmaterialen toe, vaak ook als ze niet helemaal "lamberts" zijn.

3.4. INVERSE-KWADRATEN WET EN FOUTEN-PROGNOSE

Probleem 4 (§ 3.3.4) laat zien dat de inverse-kwadraten wet voor zo'n lichtbron met een grote doorsnede een hogere uitkomst dan de algemene verlichtingsformule geeft. De werkelijke verlichtingssterkte wordt met de algemene verlichtingsformule berekend. De inverse-kwadraten wet geeft voor een niet-puntbron een benadering.

- Het verschil tussen deze uitkomsten is een fout: een afwijking van de werkelijke waarde.
- Zo'n fout kan uitgedrukt worden in de eenheden van de betreffende grootheid; we spreken dan van een *absolute fout* (Δx_i).

$$\Delta x_i = x_i - x_{\text{werkelijk}}$$

- Als de fout wordt uitgedrukt als fractie of percentage van de betreffende waarde van de grootheid, dan spreken we van de *relatieve fout*.

$$\frac{\Delta x_i}{x_i} = \frac{x_i - x_{\text{werkelijk}}}{x_i}$$

3.4.1. SYSTEMATISCHE FOUT

- Indien de lichtbron geen puntbron is, zullen we met de inverse-kwadraten wet steeds een te hoge verlichtingssterkte berekenen; we vinden *systematisch* een te hoge waarde. Een dergelijke afwijking van de werkelijke waarde noemen we een *systematische fout*.

Systematische fouten ontstaan bijvoorbeeld:

- als het nulpunt van een wijzerinstrument niet met de nul op de afleesschaal overeenkomt;

- als een meetlint wordt gebruikt dat uitgerekte is;
- als een lichtmeter die niet aan de relatieve ooggevoeligheid is aangepast (fotografische belichtingsmeters), wordt gebruikt voor de meting van de verlichtingssterkte.

■ De afwijking tussen de uitkomsten in problemen 4a en 4b is ongeveer 10%. Door welke factoren wordt de grootte van deze fout bepaald? Daarvoor schrijven we de in § 3.3.1 gevonden formule een beetje om:

$$E = \pi \cdot L \cdot \frac{R^2}{h^2 + R^2}$$

$$E = \frac{\pi \cdot L \cdot R^2}{h^2} \cdot \frac{h^2}{h^2 + R^2}$$

Hierin herkennen we de term $\pi \cdot L \cdot R^2$ als het produkt van een oppervlak en de luminantie, dus als de lichtsterkte van een cirkelvormige schijf (straal R , luminantie L) in een richting loodrecht op de schijf. Dus:

$$E = \frac{I_{schijf}}{h^2} \cdot \frac{h^2}{h^2 + R^2}$$

Nu geeft de inverse-kwadraten wet een absolute afwijking ΔE van de algemene verlichtingsformule ($\cos \alpha = 1$ genomen):

$$\Delta E = \frac{I_{sch.}}{h^2} - \frac{I_{sch.}}{h^2} \cdot \frac{h^2}{h^2 + R^2}$$

$$= \frac{I_{sch.}}{h^2} \cdot \frac{R^2}{h^2 + R^2}$$

- Merk op dat deze afwijking altijd positief is: de inverse-kwadraten wet overschat dus altijd de verlichtingssterkte vanuit niet-puntbronnen.
- De relatieve fout van de inverse-kwadraten wet ten opzicht van de werkelijke waarde is:

$$\frac{\Delta E}{E_{\text{werkelijk}}} = \frac{I_{\text{sch.}} \cdot \frac{R^2}{h^2 + R^2}}{\frac{I_{\text{sch.}} \cdot h^2}{h^2 + R^2}} = \frac{R^2}{h^2}$$

Deze formule geeft de grootte van de relatieve systematische fout ten opzichte van de werkelijke waarde bij gebruik van de inverse-kwadraten wet voor de berekening van de verlichtingssterkte door lichtbronnen met een cirkelvormig schijnbaar oppervlak.

■ De gevonden afwijking is ook een goede indicatie voor de fout bij anders gevormde lichtbronnen, waarvan de grootste afmeting (D) gelijk gesteld wordt aan 2 R (de diameter van de cirkelvormige bron). Bij een verhouding tussen de grootste afmeting (D) van een lichtbron en de afstand (h), waarop met de inverse-kwadraten wet de verlichtingssterkte wordt berekend, is de systematische fout ten opzichte van de werkelijke waarde als in de tabel hiernaast (afgerond op een heel getal).

1%	als	h = 5 D
5 %	als	h = 2 D
25 %	als	h = D

■ Bij een grote systematische fout noemt men de meting of berekening niet *nauwkeurig*: er is een grote afwijking met de werkelijke waarde.

3.4.2. TOEVALLIGE FOUT

■ Een ander type fout is een afwijking die al naar het toeval wisselend van grootte en teken is: *de toevallige fout*. Er ontstaat een spreidingsgebied rondom de werkelijke waarde.

Voorbeelden van toevallige fouten zijn:

- de fout in de schatting van de aflezing van een wijzerinstrument;

- het springen van het laatste decimaal van een instrument met digitale uitlezing;
- het verkeerd aanleggen van een meetlint aan het begin van een te meten object;
- het te hard en met wisselende kracht trekken aan een meetlint.
- de theodoliet die op een wiebelend statief staat.

■ Een kleine toevallige fout geeft een goede herhaalbaarheid van de metingen onderling: we zeggen dat de meting een grote *reproduceerbaarheid* of *precisie* heeft. Omgekeerd geeft een slechte herhaalbaarheid van een meting aan dat er grote toevallige fouten optreden: de reproduceerbaarheid of precisie is gering en de spreiding groot.

- Let op: kijk nog eens wat *nauwkeurigheid* betekent, en houd de begrippen *nauwkeurigheid* en *precisie* goed uit elkaar.

3.4.3. SIGNIFICANTE CIJFERS

■ De precisie, waarmee een grootte bepaald is, of kan worden berekend, laat je ook tot uitdrukking komen in het getal dat de grootte ervan aanduidt. Naarmate de waarde meer precies is, geef je in het getal meer zinvolle of significante cijfers. Een vuistregel is dat in een einduitkomst alleen het laatst opgegeven cijfer onzeker is (en dus één of meer eenheden hoger of lager kan zijn) en het voorlaatste in ieder geval juist. (Bij tussenresultaten neem je, ter vermijding van afrondingsfouten, één cijfer extra mee; de laatste twee cijfers zijn dan onzeker).

■ Evenzo kun je de precisie van een opgegeven waarde van een grootte afschatten aan de hand van bovenstaande regel voor het aantal significante cijfers. Bijvoorbeeld: Een meting van een verlichtingssterkte gaat gepaard met een toevallige fout van 5%. De afgelezen waarde is 425. De

Vuistregel:

- Het aantal cijfers achter de komma in de uitkomst van een som of verschil van termen is gelijk aan dat van de term met het kleinste aantal cijfers achter de komma;
- Het aantal cijfers in de uitkomst van een product of quotiënt van termen is gelijk aan dat van de term met het kleinste aantal cijfers (nullen voor het getal tellen niet mee!).

absolute fout hierin is $5\% \times 425 = 21$. De werkelijke waarde ligt dus tussen 446 en 404. De laatste twee cijfers van 425 zijn dus onzeker. Het is alleen zinvol om op te geven: $4,2 \pm 0,2 \times 10^2$ lux. Indien dezelfde meting met een toevallige fout van 1% wordt uitgevoerd, zal het aantal significante cijfers toenemen: $(42,5 \pm 0,4) \times 10$ lux. Indien slechts 425 lux wordt opgegeven zou dit betekenen dat de werkelijke waarde ligt tussen 426 en 424 lux: een relatieve spreiding van ongeveer 0,25%.

3.4.4. FOUTEN-PROGNOSE

- Vaak doet zich het probleem voor dat een grootheid pas via een aantal rekenkundige bewerkingen uit verschillende andere grootheden kan worden berekend. Hoe werkt dan de fout in de waarde van de ene grootheid door in de waarde van de andere grootheid?

- We kunnen hier natuurlijk achter komen door het sommetje te maken. Deze omslachtige weg zullen we eerst volgen, om een en ander duidelijk te maken. Beter is om vooraf al een schatting van de te verwachten fout te maken: een fouten-prognose. Je weet dan van tevoren hoe precies je je berekeningen of metingen moet uitvoeren!

- Uit zo'n prognose blijkt dan soms ook dat één van de gemeten grootheden zo ernstig de precisie van de berekende grootheid beïnvloedt, dat een ander meetinstrument of een andere meetmethode op zijn plaats is.

- We zullen dit aan de hand van het volgende experiment toelichten.

In de niet verduisterde collegezaal willen we de lichtsterkte van een halogeenprojectielamp bepalen. Daartoe hebben we ter beschikking:

- a. een verlichtingssterktemeter met een ijkfout van 1% van de aflezing, en een afleesfout van 1 digit.
 - b. een rail met een maatstreep om de 0,5 meter; de aflezing schatten we op 5 cm.
- De lichtsterkte van een lichtbron kan niet direct worden gemeten, *maar moet worden berekend uit een verlichtingssterkte op "grote" afstand:*

$$I_{lamp} = \frac{E_{lamp} \cdot r^2}{\cos \alpha}$$

We zullen nu de grootte van de fouten in de afzonderlijke termen achtereenvolgens bepalen. Omdat de zaal niet verduisterd is, moeten we E_{lamp} bepalen uit:

$$E_{lamp} = E_{lamp+zaal} - E_{zaal}$$

De meting van $E_{lamp+zaal}$ geeft een aflezing van 174 lux. De maximale absolute toevallige fout hierop is $1\% \times 174 + 1 = 3$ lux. De meting van E_{zaal} geeft een afgelezen waarde van 86 lux. De maximale toevallige fout is $1\% \times 86 + 1 = 2$ lux. De verlichtingssterkte tengevolge van de lamp alleen is het verschil van beide waarden: er ontstaat echter een range waarbinnen E_{lamp} kan liggen:

$$E_{lamp_{max}} = E_{lamp+zaal_{max}} - E_{zaal_{min}} = 177 - 84 = 93 \text{ lux}$$

$$E_{lamp_{min}} = E_{lamp+zaal_{min}} - E_{zaal_{max}} = 171 - 88 = 83 \text{ lux}$$

Uit deze range vinden we voor de verlichtingssterkte tengevolge van de lamp alleen:

$$E_{lamp} = 88 \pm 5 \text{ lux}$$

We merken hier op dat de maximale, totale absolute fout in het verschil gelijk is aan de som van de absolute fouten in de afzonderlijke termen ($E_{lamp+zaal}$ en E_{zaal}).

■ Dit is een algemene eigenschap: *de maximale fout in een som of verschil van termen is de som (ΔU) van de absolute fouten in de afzonderlijke termen Δx_i :*

$$\Delta U = \Delta x_1 + \Delta x_2 + \dots$$

Door deze formule toe te passen kun je al van tevoren de grootte van de maximaal te verwachten fout in de uitkomst van een berekening voorspellen!

Voor de bepaling van de afstand moeten we op de "meetlat" twee aflezingen doen welke beide 5 cm fout kunnen zijn. De geschatte afstand van de lamp tot de meetcel is $r = 1,3 \pm 0,1$ meter. De grootte van deze absolute fout volgt onmiddellijk uit bovenstaande formule. De relatieve fout in de afstand is dan 7,6%.

Op het oog hebben we het lichtontvangend oppervlak van de cel loodrecht op de stralenbundel uit de lamp geplaatst. De fout die we hierin gemaakt hebben is 5°. De stralenbundel valt loodrecht in, zodat de $\cos \alpha$ tussen 0,996 en 1 ligt; een relatieve fout van 0,4%.

Nu kunnen we de lichtsterkte van de lamp berekenen; er ontstaat weer een range.

$$I_{lamp_{max}} = \frac{E_{lamp_{max}} \cdot r_{max}^2}{\cos \alpha_{min}} = \frac{93 \cdot 1,4^2}{0,996} = 183 \text{ cd}$$

$$I_{lamp_{min}} = \frac{E_{lamp_{min}} \cdot r_{min}^2}{\cos \alpha_{max}} = \frac{83 \cdot 1,2^2}{1} = 119 \text{ cd}$$

Uit deze range volgt dan de lichtsterkte van de halogeenlamp $I_{lamp} = 151 \pm 32$ cd. De relatieve

toevallige fout in deze lichtsterktebepaling is dus 21%.

■ Hier merken we op dat de fout in de uitkomst van deze berekening met produkten en een quotiënt niet direct volgt uit de afzonderlijke absolute fouten. Kijken we echter naar de relatieve fout dan zien we:

$$\begin{aligned} E_{lamp} &= 88 \text{ lux} \pm 5,6\% \\ r &= 1,3 \text{ m} \pm 7,6\% \\ \cos\alpha &= 0,99 \pm 0,4\% \end{aligned}$$

De som van deze relatieve fouten

$$\begin{aligned} \frac{\Delta I}{I} &= \frac{\Delta E}{E} + \frac{\Delta r}{r} + \frac{\Delta r}{r} + \frac{\Delta \cos\alpha}{\cos\alpha} \\ &= 5,6 + 2 \cdot 7,6 + 0,4 = 21\% \end{aligned}$$

waarbij we de fout in r twee maal meetellen (r staat in het kwadraat!) is gelijk aan wat we hierboven hebben gevonden.

■ Ook dit is een algemene eigenschap: *de maximale relatieve toevallige fout in de uitkomst ($\Delta U/U$) van een produkt of quotiënt is gelijk aan de som van de relatieve fouten in de afzonderlijke variabelen x_i :*

$$\frac{\Delta U}{U} = \frac{\Delta x_1}{x_1} + \frac{\Delta x_2}{x_2} + \dots$$

- Let op: als een variabele in een formule meerdere keren voorkomt, telt de fout even zo vele keren mee!

Voor elke meting kunnen we met de som en/of productregel de grootte van de uiteindelijke fout voorspellen. Dit is de fouten-prognose op grond van de fouten in de afzonderlijke variabelen van een grootheid. Je ziet dat de omslachtige weg van een dubbele berekening om de range te bepalen niet

nodig is: in het vervolg maak je gebruik van de genoemde regels.

■ De fouten-prognose stelt ons in staat van te voren een schatting van de fout in de uitkomst te maken. Hadden we dat direct gedaan dan was gebleken dat de fout in de afstandsbepaling wel erg zwaar doortelt, en dat de bepaling al gauw een stuk preciezer zou zijn als deze afstandsmeting met een beter instrument zou worden uitgevoerd.

Overigens zij opgemerkt dat de maximale fout wel een erg pessimistisch beeld geeft: men doet alsof alle fouten tegelijkertijd dezelfde kant op werken. Voor van het toeval afhingende fouten is dit natuurlijk niet zo. Later in het college Statistiek zal blijken dat kwadratische optelling van de absolute respectievelijk de relatieve fouten een betere schatting geeft.

3.5. GRAFISCHE BEPALING VAN DE ALGEMENE VERLICHTINGSFORMULE.

3.5.1. CONFIGURATIEFACTOR: HEMELFACTOR

Laten we nog even teruggaan naar het resultaat van § 3.3.1: de formule voor de verlichtingssterkte loodrecht op de as van een cirkelvormige bron.

$$E = \pi \cdot L \frac{R^2}{h^2 + R^2}$$

Om de waarde te schatten voor het geval dat R zeer groot wordt (of beter R groot ten opzichte van h) schrijven we dit als volgt:

■ Voor R groot ten opzichte van h nadert h^2/R^2 naar 0, zodat de verlichtingssterkte voor dit geval onafhankelijk van de afstand wordt en de simpele

$$E = \pi \cdot L \frac{1}{1 + \frac{h^2}{R^2}}$$

uitdrukking krijgt:

$$E = \pi \cdot L$$

■ Met deze formule is dus de verlichtingssterkte onder een zeer groot plafond met een luminantie L te berekenen. Als de luminantie constant is over het oppervlak en lamberts, doet het er niet toe hoe het gevormd is. Het mag ook een koepel zijn die zich slaat om het punt P , waar je de verlichtingssterkte wilt weten. Met andere woorden: ook de verlichtingssterkte van een volledige hemelkoepel met uniforme luminantie geeft een verlichtingssterkte volgens deze formule.

■ Natuurlijk is dit resultaat ook te vinden door de algemene verlichtingsformule rechtstreeks te integreren. De integraal is echter lastig op te lossen voor grillig gevormde lichtbronnen. Daarom maken we in de bouwfysica gebruik van de volgende grafische methode, om de verlichtingssterkte tengevolge van willekeurig gevormde lichtbronnen te bepalen.

We delen de hemisfeer — die een uniforme luminantie heeft — op in kleine partjes, zodanig dat de bijdrage tot de verlichtingssterkte in punt P ten gevolge van elk van de partjes gelijk is. Als de hemisfeer in N (bijv. 10000) partjes is opgedeeld, dan is de verlichtingssterktebijdrage van één partje:

$$E_{\text{partje}} = \frac{1}{N} \cdot \pi \cdot L$$

PRAKTIJKVOORBEELD

• VERONDERSTEL DAT DE HEMEL OF EEN ZWAARBEWOLKTE, REGENACHTIGE DAG EEN UNIFORME LUMINANTIE HEEFT. DE HORIZONTALE VERLICHTINGSSTERKTE IN HET VRIJE VELD IS 12875 LUX. VANUIT EEN RAAM ($\tau = 0,85$) IN EEN VERTREK KIJK JE UIT OP HET WOLKENDEK. HOE GROOT IS DE WAARGENEOMEN LUMINANTIE? DE HEMEL KUNNEN WE BESCHOUWEN ALS EEN BRON MET ZEER GROOT OPPERVLAK; DAN IS:

$$L_{\text{Hemel}} = \frac{E}{\pi} = \frac{12875}{\pi} = 4098,2 \frac{\text{cd}}{\text{m}^2}$$

DEZE LUMINANTIE NEEM JE WAAR DOOR HET RAAM HEEN, DUS:

$$L_{\text{door raam}} = \tau \cdot L_{\text{Hemel}} = 0,85 \cdot 4098,2 = 3,48 \cdot 10^3 \frac{\text{cd}}{\text{m}^2}$$

■ De grootte van de partjes op het boloppervlak van de (geprojecteerde) hemisfeer kan niet gelijk zijn. Naarmate de elevatie van het partje toeneemt, wordt het ingenomen deel van het boloppervlak kleiner. (Ga dit na bijv. met de inverse-kwadraten wet).

Wanneer we nu door middel van een projectiemethode een lichtbron op de halve bol kunnen projecteren en vervolgens het aantal op-de-halve-bol-"bedekte"-partjes tellen — laten dit er n zijn — dan is de verlichtingssterkte in punt P tengevolge van deze lichtbron:

$$E = \frac{n}{N} \cdot \pi \cdot L$$

■ Deze methode wordt vaak gebruikt om de directe verlichtingssterkte van daglichtopeningen te bepalen. De halve bol is dan de hemelkoepel (met uniforme luminantie!) en de fractie n/N wordt dan *hemelfactor* genoemd. Buiten het gebied van lichtberekeningen staat deze fractie bekend als de configuratiefactor.

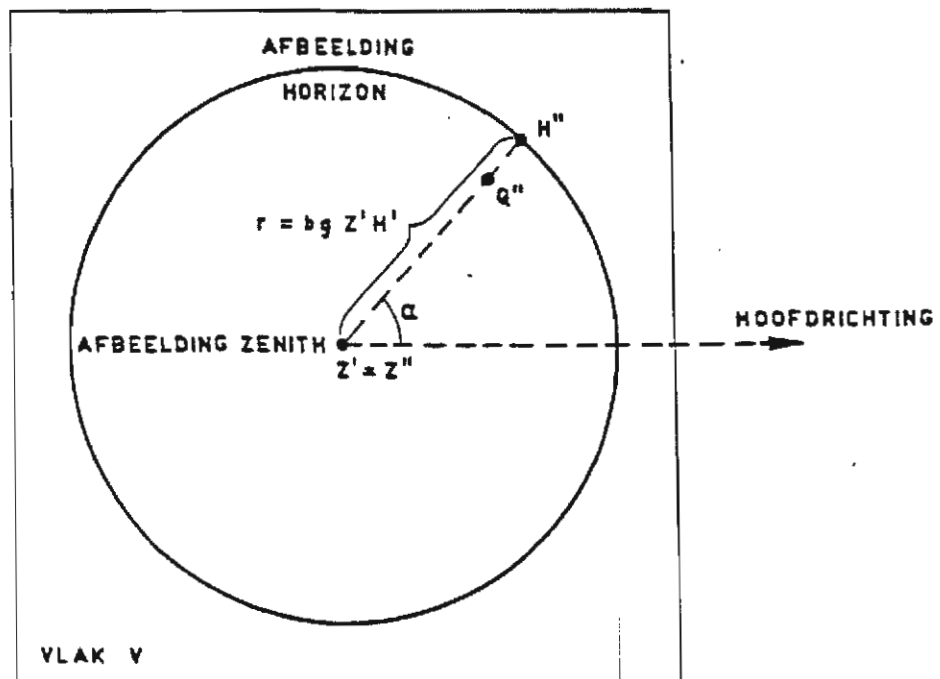
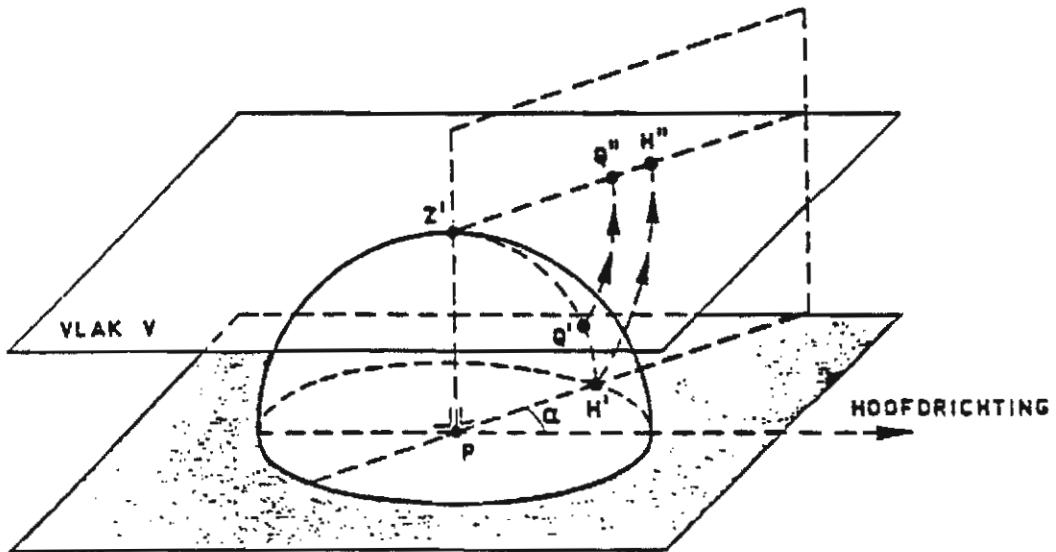
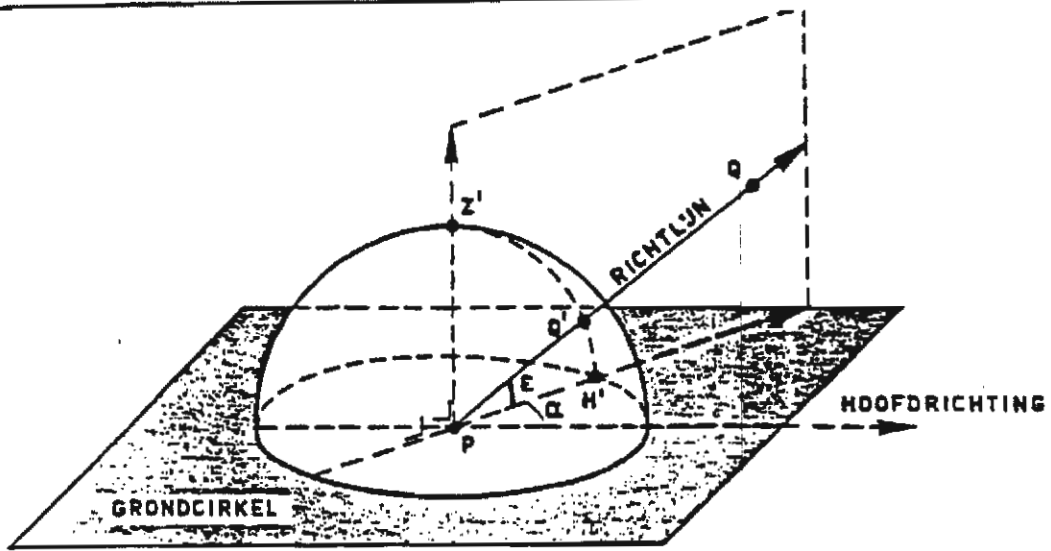
3.5.2. RADIAALDIAGRAM

■ Een projectie van de omgeving rond punt P op een halve bol is nog niet handig te verwerken: het boloppervlak moet nog naar het platte vlak worden geprojecteerd. We nemen als projectievlak een vlak in het zenit rakend aan de halve bol.

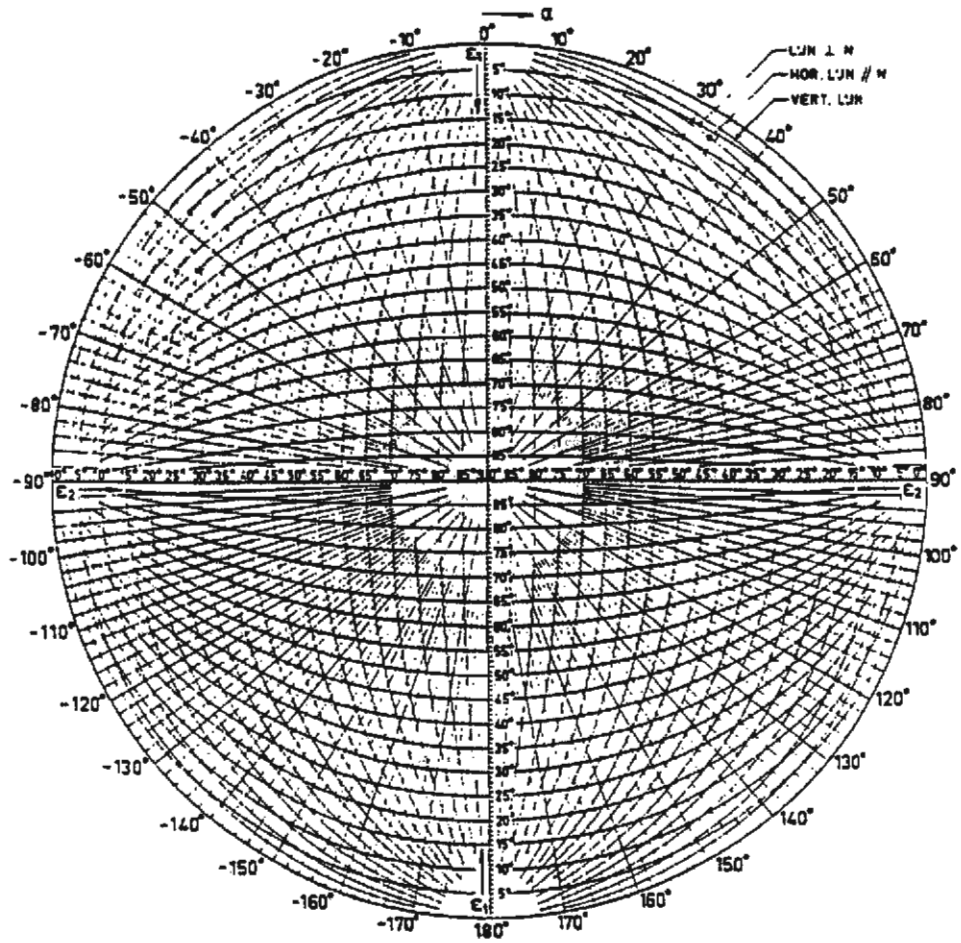
■ Als plaatsaanduiding op het halve-bol oppervlak gebruiken we de volgende termen.

Zenit: het hoogste punt van de halve bol; het punt loodrecht boven een horizontaal vlak.

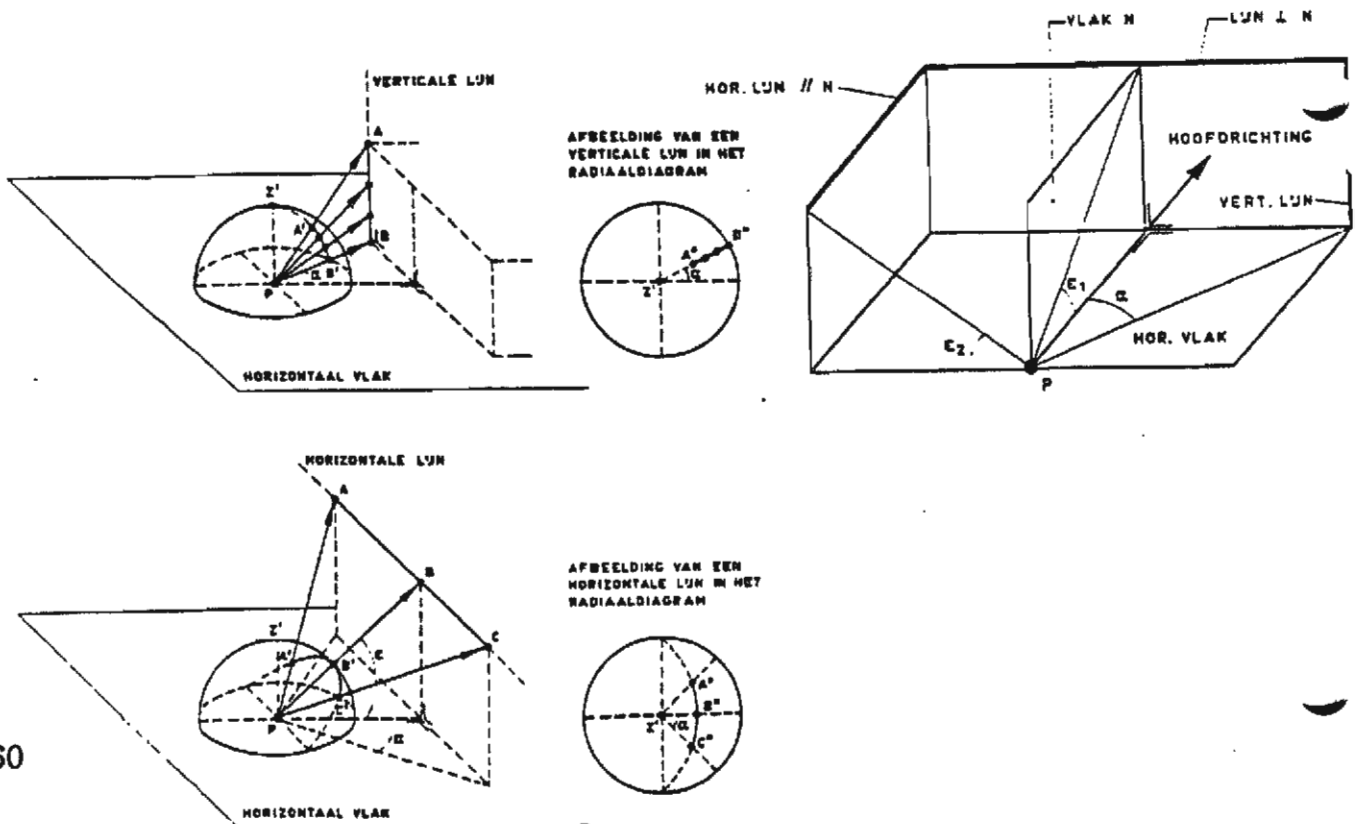
Azimut: de hoek die de richting van een punt in het horizontale vlak aangeeft ten opzichte van een gekozen richting.



BEREKENING VAN DE DIRECTE VERLICHTINGSSTERKTE



RADIAALDIAGRAM VOOR BELEMMERINGEN



Elevatie: de hoek die de richting van een punt maakt met het horizontale vlak.

- Elk punt van de halve bol wordt nu in het projectievlak gerepresenteerd door een punt met gelijk azimut, op een afstand van het raakpunt ter grootte van de boogafstand (over de bol) tot het zenit. Deze hoek is 90 verminderd met de elevatie.

- Eenvoudig is in te zien dat de horizon een cirkel in het projectievlak wordt; een verticale lijn in de ruimte een straal van deze cirkel, en dat horizontale lijnen gekromde lijnen in het projectievlak worden, die lopen vanaf de horizon via de hoogste elevatie (te vinden uit de hoogte in een vlak loodrecht op de horizontale lijn) naar de horizon aan de tegenoverliggende zijde.
- Een en ander is uitgewerkt (zie figuren) in het zo genoemde radiaaldiagram. In het diagram zijn horizontale lijnen in een tweetal (loodrecht op elkaar staande) richtingen en verschillende elevatie, en verticale lijnen bij een groot aantal azimut hoeken, voorgedrukt.
- Een bijbehorend diagram voor de bepaling van de fractie n/N is het *T.U.E.-hemelfactor diagram voor uniforme hemel*. Voor het radiaaldiagram zijn ook transparanten ontwikkeld, waarop de mogelijkheid van zontoetreding tot een punt in een vertrek kan worden afgelezen.

DOELSTELLINGEN HOOFDSTUK III (VERVOLG)

Na het doorwerken van dit deel van het hoofdstuk dien je:

- *de algemene verlichtingsformule te kennen en de componenten te kunnen benoemen;*
 - *de afleiding te kunnen geven;*
 - *aan de hand van een bouwkundige situatie de betekenis van de grootheden te kunnen duidelijk maken en te kunnen aangeven hoe de componenten uit de algemene verlichtingsformule de resulterende verlichtingssterkte beïnvloeden; geef voorbeelden uit bouwkundige situaties waaruit dit blijkt;*
 - *lichtsituaties (ontleend aan je eigen omgeving) te kunnen noemen en herkennen waarin deze wet geldig is en kan worden gebruikt;*
 - *de inverse-kwadraten wet te herkennen als een bijzondere vorm van de algemene verlichtingsformule met beperkte geldigheid; te weten welke fouten marges kunnen optreden bij gebruik van de inverse-kwadraten wet bij niet-puntbronnen;*
 - *te weten onder welke voorwaarde een extreme situatie wordt bereikt en te weten naar welke vorm de formule dan overgaat;*
 - *oplossingen van de algemene verlichtingsformule voor speciale gevallen te kennen en te kunnen gebruiken (cirkel-vormige, rechthoekige, hemisferische lichtbron, radiaal-diagram, lichttoetreding tot een vlak met oneindige belemmering); te weten hoe de projectiemethode van het radiaaldiagram werkt, en het diagram te kunnen gebruiken;*
- *te weten wat de eigenschap van een lambertstraler is, en voorbeelden te kunnen geven van oppervlakken die wel en niet hieraan voldoen; te weten wat het verband is tussen de luminantie en de emittantie bij een lambertstraler, en het te kunnen toepassen op translucente en reflecterende materialen;*
- *blijk te geven van elementaire kennis over de behandeling van toevallige en systematische fouten in berekeningen, tussenresultaten en einduitkomsten;*
- *het begrip hemelfactor te kennen, en deze factor te zien als een speciale oplossing van de algemene verlichtingsformule; voorbeelden te kunnen noemen van toepassing in zowel kunst- als daglichtsituaties;*
- *een situatie met niet-puntbronnen en directe verlichting te kunnen analyseren, en daarin een (verlichtingskundige) grootte te kunnen berekenen;*

4. HANDBEREKENINGEN EN DE TOTALE VERLICHTINGSSTERKTE

4.1. INTERREFLECTIES — DE INDIRECTE VERLICHTINGSSTERKTE

■ In hoofdstuk 3 was het hoofdthema de berekening van de verlichtingssterkte in een punt op een vlak tengevolge van één ander vlak met een zekere luminantie (bijv. een lichtbron). Op dezelfde wijze geeft natuurlijk de luminantie van elk vlak (bijvoorbeeld een wand) in de omgeving van een ander vlak (bijvoorbeeld een tafel) een bijdrage tot de verlichtingssterkte op dat andere vlak (de tafel)

■ Wanneer we alleen de verlichtingssterkte bedoelen die ontstaat door licht rechtstreeks uit de lichtbron (een armatuur, een daglichtopening), spreken we over *direct licht* en de *directe verlichtingssterkte*. Licht dat van elders komt, gereflecteerd wordt, is de bijdrage van de interreflecties; we spreken dan over het *indirecte licht* en de *indirecte verlichtingssterkte*. De som van de directe en de indirecte verlichtingssterkte noemen we de *(totale) verlichtingssterkte*.

■ Het volgende experiment laat zien hoe groot de bijdrage van interreflecties wel kan zijn. In de opstelling verlicht een gloeilamp het grondvlak dat wit geschilderd is. De luminantie aan dit vlak meten we met een glasfiber opnemer, de afgelezen waarde is 1560. De reflectiefactor van dit witte vlak is 85%. Wanneer we nu over deze lamp en het grondvlak een van binnen zwart geschilderde kap (reflectiefactor 3%) plaatsen, verandert de luminantie van het grondvlak maar weinig (de afgelezen "luminantiewaarde" is 1585). Wat is er ge-

beurd? Het zaallicht valt niet meer op het grondvlak, maar het lamplicht dat eerst in de zaal verdween, verlicht nu de zwarte kap. Volgens § 3.3.5 zal de luminantie van de zwarte binnenkant toch maar laag zijn, en dus maar een beetje bijdragen tot de verlichting van het grondvlak.

Vervangen we de zwarte kap door een van binnen wit geschilderde kap, dan lezen we een "luminantiewaarde" van 6670 af.

■ We zien dus dat in dit experiment de totale verlichtingssterkte op het grondvlak (de bijdrage van het directe licht van de lamp plus de bijdrage van de interreflecties — de indirecte verlichtingssterkte — veroorzaakt door de wand van de doos) aanzienlijk groter is dan de directe bijdrage.

■ De totale verlichtingssterkte is de som de directe verlichtingssterkte en de indirecte verlichtingssterkte. Deze totale verlichtingssterkte is in feite "de" verlichtingssterkte die ontstaat in werkelijke ruimten.

4.2. VERLICHTINGSREGEL VOOR "OMSLOTEN" RUIMTEN.

■ Een nauwkeurige berekening van de totale verlichtingssterkte op bijvoorbeeld een werktafel vereist een rigoureuze kennis van alle bijdragen van licht-uitstralende en/of licht-reflecterende vlakjes in de hemisfeer boven die werktafel. Als de afzonderlijke luminanties van die hemisfeerdelen niet bekend zijn, dan zullen ze moeten worden berekend uit de directe lichtstromen. Voor een gecompliceerde verdeling van luminanties is dit, vaak alleen nog voor schoenendoosachtige ruimten, "goed" te berekenen met een flinke computer. In een computerprogramma als *TUELITE* worden al die bijdragen meegenomen. Op het niveau van een zakrekenmachine zijn alleen "schattingen" mogelijk of benaderingen voor zeer gestileerde gevallen.

Hoewel je soms aanzienlijke afwijkingen met de werkelijkheid moet constateren, zullen we toch deze "benaderingsmethoden" bespreken, omdat ze erg handig zijn in het beginstadium van een lichtontwerp.

■ De *verlichtingsregel* levert onder bepaalde voorwaarden zo'n schatting of benadering.

Onderstel een oppervlak 1 dat een lichtstroom ontvangt: $\phi_{opv.1}$

Deze lichtstroom wordt deels door het oppervlak gereflecteerd: $\phi_{\rho 1}$, deels doorgelaten: $\phi_{\tau 1}$ en deels omgezet in iets anders, dus geabsorbeerd $\phi_{\alpha 1}$. Het totaal van deze lichtstromen zal gelijk zijn aan de opvallende lichtstroom:

$$\phi_{opv.1} = \phi_{\rho 1} + \phi_{\tau 1} + \phi_{\alpha 1}$$

of

$$\phi_{opv.1} - \phi_{\rho 1} = \phi_{\tau 1} + \phi_{\alpha 1}$$

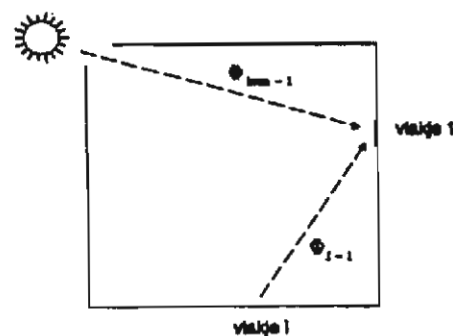
In het rechter lid voeren we de transmissiefactor τ en de absorptiefactor α in, en schrijven we de opvallende lichtstroom $\phi_{opv.1}$ als produkt van de verlichtingssterkte E_1 en het oppervlak A_1 , dan:

$$\phi_{opv.1} - \phi_{\rho 1} = (\tau_1 + \alpha_1) \cdot E_1 \cdot A_1$$

Oppervlak 1 maakt deel uit van de binnenzijde van een gesloten oppervlak, dat aldus in i andere vlakjes is verdeeld. Voor elk van de i vlakjes is een uitdrukking als voor 1 te schrijven.

De opvallende lichtstroom $\Delta\phi_{opv.1}$ bestaat uit

- een bijdrage $\Delta\phi_{bron \rightarrow 1}$ van de lichtbron naar oppervlak 1,
- de door de andere i oppervlakken naar oppervlak 1 gereflecteerde lichtstroom $\phi_{inter \rightarrow 1}$.



Dus:

$$\phi_{opv.1} = \Delta \phi_{bron-1} + \phi_{inter-1}$$

We kunnen nu schrijven:

$$\Delta \phi_{bron-1} + \phi_{inter-1} - \phi_{\rho 1} = (\tau_1 + \alpha_1) \cdot E_1 \cdot A_1$$

Evenzo voor alle andere i oppervlakken.

Optellen van al deze i vergelijkingen levert:

$$\sum_i \Delta \phi_{bron-i} + \sum_i \phi_{inter-i} - \sum_i \phi_{\rho i} = \sum_i (\tau_i + \alpha_i) \cdot E_i \cdot A_i$$

In het rechter lid staat de totale lichtstroom, die 'uit' de "omsloten" ruimte verdwijnt door absorptie in, of transmissie door de ruimtebegrenzingsen.

De eerste term uit het linker lid is in feite de totale lichtstroom ϕ_{bron} die door de lichtbron het gesloten oppervlak in wordt gezonden. De tweede term is de lichtstroom die door alle vlakjes tezamen, van alle andere vlakjes wordt ontvangen. En in de derde term staat de lichtstroom die door alle vlakjes tezamen naar alle andere vlakjes wordt uitgezonden. In de tweede en derde term ontstaat geen licht: dus de ontvangen lichtstroom moet gelijk zijn aan de uitgezonden lichtstroom, voor het verschil moet gelden:

$$\sum_i \phi_{inter-i} - \sum_i \phi_{\rho i} = 0$$

Invullen levert dan:

$$\phi_{bron} = \sum_i (\tau_i + \alpha_i) \cdot E_i \cdot A_i$$

of met $\tau + \alpha_i = 1 - \rho_i$

• Dit is in feite een behoudswet: de grootte van de (licht-)energiestroom die in het vertrek wordt gebracht, is gelijk aan de stroom die eruit verdwijnt.

$$\Phi_{bron} = \sum_i (1 - \rho_i) \cdot E_i \cdot A_i$$

Verlichtingsregel

- Dit is de *verlichtingsregel* voor een gesloten oppervlak.

4.3. BEPERKINGEN VAN DE VERLICHTINGSREGEL

■ Als in een gesloten oppervlak van alle deelopervlakjes alle bijbehorende verlichtingssterkten en reflectiefactoren bekend zijn, dan geeft deze verlichtingsregel nauwkeurig de benodigde lichtstroom van de lichtbron. Want in de verlichtingsregel staat alleen, dat — voor een constante verlichtingssterkte — al het licht dat per tijdseenheid in het gesloten oppervlak wordt geabsorbeerd, ook door een lichtbron binnen de "omsloten" ruimte moet worden gebracht. De verlichtingsregel in deze vorm zegt niets over de verdeling van de verlichtingssterkten. Pas als daarover meer gegevens bekend zijn kan de verlichtingsregel ook van rechts naar links worden gelezen, en zou één verlichtingssterkte kunnen worden berekend.

■ De verleiding is groot om ook in het ontwerpstadium deze formule te gebruiken. Wat zijn dan de beperkingen? Beschouw het volgende voorbeeld: Neem op de verschillende ruimtebegrenzingsen een verlichtingssterkte aan, zoals aangegeven in het kader hiernaast.

Het is echter nog zeer de vraag of de in het kader gegeven verlichtingssterkten ook werkelijk "ontstaan". De deuren bijvoorbeeld zullen apart moeten worden aangelicht om de afwijkende verlichtingssterkte ten opzichte van de wanden te verkrijgen, terwijl de vloer zo helder is, dat de bijdrage op het

Veronderstelde lichtverdeling in een kamer

	A m ²	ρ	E lux
Plafond	20	0,7	100
Vloer	20	0,5	500
Deuren	8	0,2	200
Zijwanden	60	0,4	150

plafond daarvan al groter is dan de aangegeven 100 lux.

- Let op: De reflectiefactoren in het kader zullen in deze combinatie zelden voorkomen: de vloer is erg licht van tint, gebruikelijker is een reflectiefactor (ρ) van 0,1 à 0,2.

- In een bestaande ruimte met een gegeven opstelling van de lichtbronnen, zouden we door een minitieuze meting van alle E_i en A_i en ρ_i kunnen met de verlichtingsregel kunnen komen tot een berekening van de door de lichtbronnen uitgezonden lichtstroom.

Uit de verlichtingssterkten in het kader kan alleen een ruwe schatting van de benodigde lichtstroom worden gemaakt. De lichtstroom van de lichtbronnen zou volgens de verlichtingsregel $1,23 \cdot 10^4$ lumen moeten zijn.

- De verlichtingsregel kun je alleen in het ontwerp stadium voor een allereerste schatting van de benodigde lichtstroom toepassen. Als je in de verlichtingsregel de verlichtingssterkte als onbekende neemt, moet je iets aannemen over de verdeling van het licht. Dit geldt in het bijzonder voor de verlichtingssterkte op het 'werkvlak', zie hierna.

Merkwaardigerwijs correleert de *visuele indruk van een ruimte* juist heel sterk met de via de verlichtingsregel berekende 'luminantie gemiddeld over alle ruimtebegrenzungen'. De indruk 'licht' of 'somer' van een ruimte wordt veel meer bepaald door de helderheid van alle in een ruimte voor de waarnemer zichtbare vlakken.

4.4. VOORWAARDEN VOOR DE VERLICHTINGSREGEL

4.4.1. GEMIDDELDE VERLICHTINGSSTERKTE IN EEN RUIMTE

■ Een omgekeerd gebruik van de verlichtingsregel, waarbij uit een gegeven lichtstroom van de bron de verlichtingssterkte moet worden berekend, kan alleen in gestileerde gevallen. Het belangrijkste probleem is dat er teveel onbekenden zijn. Als daar niet in kan worden voorzien, blijft de aanname van op-elk-vlak-gelijke-verlichtingssterkte over. Dit is dan een "gemiddelde verlichtingssterkte" E_{gem} , die op alle ruimtebegrenzungen gelijkelijk aanwezig wordt verondersteld. Definiëren we ook een gewogen gemiddelde reflectiefactor volgens:

$$\rho_{gem} = \frac{\sum_i \rho_i \cdot A_i}{\sum_i A_i} = \frac{\sum \rho_i \cdot A_i}{A_{tot}}$$

gemiddelde reflectiefactor

Dan is "gemiddelde verlichtingssterkte" over de binnenkant van een gesloten oppervlak:

$$E_{gem} = \frac{\Phi_{bron}}{(1 - \rho_{gem}) \cdot A_{tot}}$$

E_{gem} op ruimtebegrenzungen

■ Deze gemiddelde verlichtingssterkte (gemiddeld over wanden, vloer en plafond!) is een totale verlichtingssterkte, waarin de directe en indirecte component zijn verdisconteerd.

■ De "echte" verlichtingssterkten op de *afzonderlijke* ruimtebegrenzungen kunnen flink afwijken. Globaal wordt aan de vlakken met hoge reflectiefactor in deze berekening meer licht, en aan de vlakken met lage reflectiefactor minder licht dan

• De indirecte component van de verlichtingssterkte ontstaat uit de (aan de ruimtebegrenzungen) gereflecteerde lichtstroom; je kunt deze component berekenen door de 'totale verlichtingssterkte — gemiddeld over alle ruimtebegrenzungen' uit de formule hiernaast, te vermenigvuldigen met de gemiddelde reflectiefactor ρ_{gem}

$$E_{indirect} = \frac{\Phi_{bron} \cdot \rho_{gem}}{(1 - \rho_{gem}) \cdot A_{tot}}$$

E_{indirect} op ruimtebegrenzungen

Bereken ook eens de 'luminantie — gemiddeld over alle ruimtebegrenzungen'.

Ga ook voor jezelf na waar de 'directe verlichtingssterkte — gemiddeld over alle ruimtebegrenzungen' aan voldoet!

in de "werkelijkheid" toegerekend. Toch wordt deze benadering als *handrekenmethode* of eerste schatting vaak gebruikt om een "gemiddelde" totale verlichtingssterkte te berekenen. Zie ook in § 4.5 voor een toepassing.

4.4.2. GEMIDDELDE VERLICHTINGSSTERKTE OP EEN ZEER GROOT VLOEROPPervLAK VAN EEN HAL

■ We zullen nu nog een voorbeeld behandelen waarin wel voldoende vergelijkingen zijn voor de onbekende verlichtingssterkte. De ruimtevorm denken we gestileerd tot een "taartdoos": uitgestrekte horizontale oppervlakken in verhouding tot de verticale. We veronderstellen de horizontale vlakken zo groot dat de bijdrage van de wanden tot de verlichtingssterkte op vloer en plafond mag worden verwaarloosd. Verder ontvangt het plafond geen direct licht van een lichtbron. Al het licht op het plafond komt van de vloer, dan benaderen we met

$$E_{\text{plafond}} = \pi \cdot L_{\text{vloer}} = \rho_{\text{vloer}} \cdot E_{\text{vloer}}$$

De verlichtingsregel toegepast op een dergelijk grote ruimte luidt:

$$\Phi_{\text{bron}} = (1 - \rho_{\text{plafond}}) \cdot E_{\text{plafond}} \cdot A_{\text{plafond}} + (1 - \rho_{\text{vloer}}) \cdot E_{\text{vloer}} \cdot A_{\text{vloer}}$$

We vullen de verlichtingssterkte op het plafond in, en stellen het plafondoppervlak A_{plafond} gelijk aan het vloeroppervlak A_{vloer} , dan kunnen we schrijven:

$$\frac{\Phi_{\text{bron}}}{A_{\text{vloer}}} = (1 - \rho_{\text{plafond}}) \cdot \rho_{\text{vloer}} \cdot E_{\text{vloer}} + (1 - \rho_{\text{vloer}}) \cdot E_{\text{vloer}}$$

• In de verlichtingskunde wordt de ruimtevorm aangegeven met de verhouding tussen het horizontale en het verticale vertrekoppervlak; dit is de *ruimte-index* k (l: lengte, b: breedte, h: hoogte van het vertrek):

$$k = \frac{\text{horizontaal oppervlak}}{\text{verticaal oppervlak}} = \frac{\dots}{h \cdot l}$$

De in deze paragraaf besproken formule voor de verlichtingssterkte op de vloer van een grote hal mag je toepassen, indien de $k \geq 3,5$.

■ Herleiden levert voor de totale verlichtingssterkte op de vloer van een "taartdoos" (alleen op de vloer is direct licht):

$$E_{vloer} = \frac{\Phi_{bron}}{A_{vloer}} \cdot \frac{1}{1 - \rho_{plafond} \cdot \rho_{vloer}}$$

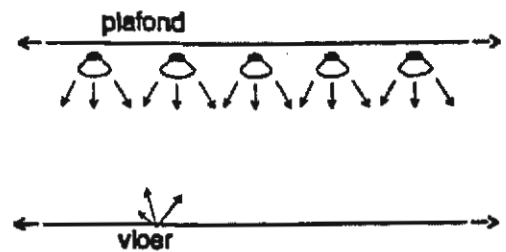
Verlichtingssterkte t.g.v. direct licht op "taartdoos"-vloer

Bovenstaande formule is goed te gebruiken voor grote hallen met daklichten of diep-stralende kunstverlichting.

■ Met een opwaartse component in de verlichting houdt deze formule geen rekening. Stel een deel van de lichtstroom is naar boven gericht ϕ_{boven} , en een deel is naar beneden gericht $\phi_{beneden}$. De verlichtingssterkte op de vloer van zo'n grote ruimte wordt dan:

$$E_{vloer} = \frac{\phi_{beneden} + \rho_{plafond} \cdot \phi_{boven}}{A_{vloer} \cdot (1 - \rho_{plafond} \cdot \rho_{vloer})}$$

Verlichtingssterkte op "taartdoos"-vloer



• In de formules hiernaast zie je, dat de verlichtingssterkte op de vloer of op een horizontaal werkvlak afhankelijk is van de lichtverdeling door de ruimte, de reflectiefactoren en de geometrie. Symbolisch weergegeven als volgt:

$$E_{vloer} = \frac{\phi}{A_{vloer}} \cdot F_1(I) \cdot F_2(k, \rho_{wand}, \rho_{vloer}, \rho_{plafond})$$

De factoren F_1 en F_2 geven (tezamen) aan welk deel van de in-de-ruimte-gebrachte lichtstroom op het werkvlak terecht komt; het product van F_1 en F_2 wordt *het verlichtingsrendement van een verlichtingsinstallatie* genoemd. Later komen we hierop terug.

4.5. TOEPASSING VAN DE VERLICHTINGSREGEL OP DAGVERLICHTING

■ Nu en in het verleden is in verscheidene bouwverordeningen in Nederland de mate van daglichttoetreding tot, en uitzicht uit woningen geformuleerd als een eis aan de minimum grootte van de daglichtopeningen in relatie tot het vloeroppervlak van het betrokken vertrek. In feite is het een zeer ruwe eis, en moet men maar afwachten waar het licht terecht komt. De gedachtengang is: hoe meer absorberend (vloer)oppervlak, hoe meer daglicht de ruimte dient binnen te komen.

■ We kunnen een en ander plausibel maken aan de hand van de — herleide — verlichtingsregel uit § 4.4.1, waarmee de gemiddelde totale verlichtingssterkte op alle ruimtebegrenzingsen kan worden berekend, en wel als volgt:

$$E_{gem} = \frac{\Phi_{bron}}{(1 - \rho_{gem}) \cdot A_{tot}}$$

Hierin nemen we voor Φ_{bron} de lichtstroom die door daglichtopeningen in (verticale) wanden het vertrek binnentreedt. (Als een — hellende — daglichtopening door een "oneindig" doorlopend obstakel wordt belemmerd, bereken je de lichtstroom volgens § 3.3.3).

Dan is:

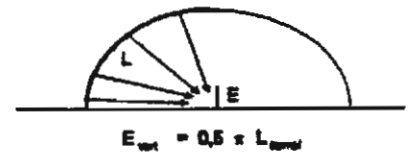
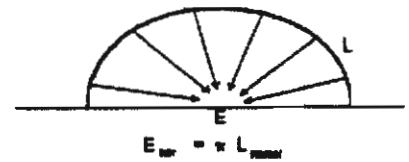
$$\Phi_{bron} = E_{buiten, verticaal} \cdot A_{ruim}$$

■ Bij een hemel met uniforme luminantie ontvangt een verticaal vlak van de halve hemelkoepel juist de helft van de horizontale verlichtingssterkte in het vrije veld:

$$E_{verticaal} = \frac{1}{2} E_{horizontaal}$$

Vervolgens drukken we de verhouding tussen het horizontale en het verticale vertrekoppervlak uit in de *ruimte-index* k (l: lengte, b: breedte, h: hoogte van het vertrek):

$$k = \frac{\text{horizontaal oppervlak}}{\text{verticaal oppervlak}} = \frac{l \cdot b}{h \cdot (l+b)}$$



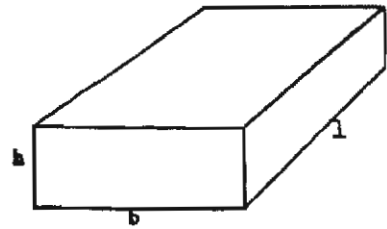
Voor een Uniforme Hemel

- Bedenk dat dit ook is af te leiden met de formule die in § 3.3.3 is gegeven.

Met deze ruimte-index kunnen we schrijven

$$A_{wanden} = \frac{2}{k} \cdot A_{vloer}$$

$$A_{tot} = \left[\frac{2}{k} + 2 \right] \cdot A_{vloer}$$



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

zodat we voor de gemiddelde verlichtingssterkte in het vertrek vinden (inclusief de bijdrage van de interreflecties):

$$E_{gem} = \frac{1}{2} \cdot E_{hor} \cdot \frac{A_{raam}}{A_{vloer}} \cdot \frac{1}{\left[\frac{2}{k} + 2 \right] \cdot (1 - \rho_{gem})}$$

gemiddelde verlichtingssterkte, verticaal glas

■ In het allereerste ontwerpstadium kunnen we — onder verwaarlozing van het lichtverlies naar buiten door de daglichtopeningen en onder de aanname dat deze daglichtopeningen dezelfde reflectiefactoren hebben als het omringende deel van de ruimtebegrenzing — de noemer van de vorige formule nog iets eenvoudiger schrijven; en wel als volgt:

$$\rho_{gem} = \frac{\rho_{vl} \cdot A_{vl} + \rho_p \cdot A_p + \rho_w \cdot A_w}{A_{tot}}$$

$$= \frac{\rho_{vl} \cdot A_{vl} + \rho_p \cdot A_{vl} + \rho_w \cdot \frac{2}{k} \cdot A_{vl}}{\left[\frac{2}{k} + 2 \right] \cdot A_{vl}}$$

$$= \frac{\rho_{vl} + \rho_p + \rho_w \cdot \frac{2}{k}}{\left[\frac{2}{k} + 2 \right]}$$

en verder is:

$$\begin{aligned}
 1 - \rho_{gem} &= 1 - \frac{\rho_{vl} + \rho_p + \rho_w \cdot \frac{2}{k}}{[\frac{2}{k} + 2]} \\
 &= \frac{\frac{2}{k} + 2 - \rho_{vl} - \rho_p - \rho_w \cdot \frac{2}{k}}{[\frac{2}{k} + 2]} \\
 &= \frac{\alpha_{vl} + \alpha_p + \alpha_w \cdot \frac{2}{k}}{[\frac{2}{k} + 2]}
 \end{aligned}$$

■ De gemiddelde verlichtingssterkte in een vertrek is dan onder bovenstaande voorwaarden ook te schrijven als:

$$E_{gem} = \frac{1}{2} \cdot E_{hor} \cdot \frac{A_{raam}}{A_{vloer}} \cdot \frac{1}{\alpha_{vl} + \alpha_p + \frac{2}{k} \cdot \alpha_w}$$

■ We zien dan dat de verlichtingssterkte E_{gem} , die op alle ruimtebegrenzungen gelijkelijk aanwezig wordt verondersteld, afhangt van de verhouding tussen het oppervlak van het raam en het vloeroppervlak. Ten aanzien van de verdeling van het licht wordt hier geen uitspraak gedaan. (Zie voor de beperkingen § 4.3) Wel wordt hier, anders dan bij de hemelfactor, rekening gehouden met de interreflecties binnen het vertrek.

■ Eenvoudig is na te gaan dat, voor het geval er meerdere ramen aanwezig zijn, de som van de lichtstromen dient te worden genomen. In aanwezigheid van belemmeringen buiten de daglichtopeningen geldt § 3.3.3. Je kunt de "totale verlich-

• Gemiddelde daglichtfactor

De verhouding E_{gem}/E_{hor} waarbij E_{hor} de horizontale verlichtingssterkte in het vrije veld is, wordt wel de 'gemiddelde daglichtfactor' genoemd. De factor is een gemiddelde over alle ruimtebegrenzungen. Indien deze verhouding $\geq 0,01$ is, wordt de daglichtbijdrage in dat vertrek (net) voldoende beschouwd. In ruimten waar deze waarde niet wordt bereikt, is aanvullende kunstverlichting (o.a. vanwege het comfort) noodzakelijk. In de praktijk is een waarde tussen de 2% en de 5% gebruikelijk. Zie ook § 5.3.

tingssterkte, gemiddeld over alle ruimtebegrenzungen" uit de verlichtingsregel afleiden:

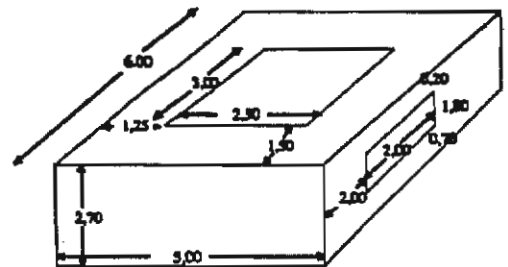
$$E_{gem} = \frac{1}{2} \cdot \frac{E_{hor}}{A_{vloer}} \cdot \frac{\Sigma [A_{daglichtopening} \cdot (\cos\beta_{klein} - \cos\beta_{groot})]}{[\frac{2}{k} + 2] \cdot (1 - \rho_{gem})}$$

gemiddelde E op de ruimtebegrenzungen, t.g.v. daglichtopeningen met oneindige belemmeringen

4.6. PRAKTIJKPROBLEMEN

5. Een ruimte met afmetingen van 5,00 x 6,00 x 2,70 m³ heeft een zijraam 2,00 m breed, 1,80 m hoog (onderdorpel op 0,70 m vanaf de vloer) en een dakraam 2,50 x 3,00 m². De transmissie van het glas is $\tau = 0,9$, de reflectiefactor van het glas is $\rho = 0,1$. De reflectiefactor van het plafond is 0,7; van de wand 0,5 en van de vloer 0,2. De buitenverlichtingssterkte op het horizontale vlak in het vrije veld is 10.000 lux. Neem een uniforme hemelluminantie aan.

- Bereken met behulp van het radiaaldiagram de directe verlichtingssterkte in een punt op de vloer in het midden van de ruimte.
- Bereken met de verlichtingsregel de gemiddelde totale verlichtingssterkte op de ruimtebegrenzungen.
- Hoe groot is de luminantieverhouding tussen de wand en het raam. Gebruik de verlichtingssterkte uit b.
- Bereken ook de luminantieverhouding voor het geval het dakraam afwezig is.



- Welke rekenmethode moet worden toegepast hangt af van het doel van de berekening. De verlichtingsregel geeft geen informatie over lokale verschillen in het verlichtingsniveau, maar is een goede 'eerste schatting' en correleert mooi met de 'visuele indruk' van een ruimte. De directe verlichtingssterkte geeft meer inzicht in de variatie van het verlichtingsniveau over een (werk)vlak, maar is nog niet 'de' verlichtingssterkte, omdat geen rekening wordt gehouden met de — vaak belangrijke — bijdrage van interreflecties. Het blijkt, dat de totale verlichtingssterkte in een punt kan worden benaderd met de som van de 'directe verlichtingssterkte in dat punt' en de 'interreflectie-component' uit de verlichtingsregel.

DOELSTELLINGEN HOOFDSTUK IV

Na het doorwerken van dit hoofdstuk dien je:

- *het begrip indirecte verlichtingssterkte te kunnen definiëren;*
 - *het ontstaan te kunnen toelichten met behulp van de algemene verlichtingsformule;*
 - *het verschil met de directe verlichtingssterkte te kunnen aangeven; situaties te kunnen beschrijven waaruit het belang van elk van beide blijkt;*
 - *te weten van het belang van de indirecte verlichtingssterkte voor de helderheidsindruk van een vertrek;*
 - *te weten dat de verlichtingssterkte in een punt kan worden gezien als de som van de directe verlichtingssterkte en de indirecte verlichtingssterkte, beide genomen in dat punt;*

 - *de verlichtingsregel te kennen en de componenten te kunnen benoemen;*
 - *te weten wat de gebruiksmogelijkheden zijn en welke de aannamen zijn die daarbij worden gemaakt;*
 - *het verschil te kennen tussen de 'gemiddelde verlichtingssterkte' en de 'verlichtingssterkte in een punt';*
 - *enig inzicht te hebben in hoe de werkelijke verlichtingssterkte afwijkt van de met de verlichtingsregel berekende 'gemiddelde verlichtingssterkte';*
 - *te weten wat het belang van de verlichtingsregel is, in het bijzonder bij (globale) daglichtberekeningen; te weten van de relatie met de 'gemiddelde daglichtfactor'; de ruimte-index te kennen;*

 - *een situatie verlichtingskundig gezien te kunnen analyseren en het belang van diverse componenten te kunnen aangeven; een verlichtingskundige grootheid (waaronder de luminantie van ruimtebegrenzingsen en de "luminantie van raamopeningen") te kunnen berekenen in een situatie met puntbronnen en niet-puntbronnen, directe en indirecte verlichting als overige grootheden gegeven of te bepalen zijn (o.a. globaal via de verlichtingsregel en meer precies door afzonderlijke berekening van de directe en de indirecte component);*
-

5. APPENDIX

5.1. PRAKTIJKPROBLEMEN

6. Een puntlichtbron van 150 W (3 W) zendt alzijdig licht uit. De verlichtingssterkte op een vlakje op een afstand van 80 cm (1 cm) is 1350 lux (7 lux).

Het oppervlakje maakt een hoek van precies 60 met de richting naar de lichtbron.

- a. Hoe groot is het lichtrendement van de lichtbron?
- b. Wat is de maximale toevallige fout in de uitkomst van a?

7. In het midden van de korte wand van een vertrek ($l \times b \times h$: $4,50 \times 3,50 \times 2,70 \text{ m}^3$) bevindt zich een raam ($b \times h$: $2,50 \times 1,65 \text{ m}^2$). De borstweringhoogte is 0,85 m.

De horizontale verlichtingssterkte op 0,85 m boven de vloer in het midden van de kamer is tengevolge van het daglicht 600 internationale eenheden. De transmissiefactor van het glas is precies 1; de reflectiefactor van de ruimtebegrenzungen is precies 0.

- a. Bereken de verlichtingssterkte in het vrije veld onder een uniforme hemel.
- b. Nu wordt in plaats van het zijraam een lichtkoepel aangebracht. De horizontale verlichtingssterkte op 0,85 m hoogte in het midden van de kamer tengevolge van de lichtkoepel wordt 600 internationale eenheden bij een verlichtingssterkte in het vrije veld van 15000 internationale eenheden. Bereken de diameter

van een lichtkoepel in het midden van het plafond.

8. Een lichtbron zendt een lichtstroom van 2000 internationale eenheden uit. Door een armatuur wordt 90,0% van dit licht gelijkmatig (naar beneden) geconcentreerd in een ruimtehoek van 0,250 internationale eenheden. Het armatuur hangt aan het plafond op 230,0 cm boven het midden van een tafelblad. Aan weerszijden van het midden van het tafelblad liggen een grijs ($\rho = 0,25$) en een wit ($\rho = 0,7$) vel papier.

- a. Bereken de absolute precisie in de berekening van de luminantieverhouding tussen het witte en het grijze vel papier.
- b. Bereken de verlichtingssterkte juist op de rand van het witte vel papier (bij het midden van de tafel).

9. Op een diffuus reflecterend tafelblad ($1,40 \times 0,80 \text{ m}^2$) met een reflectiefactor 0,50 ligt een blad mat-wit ($\rho = 0,80$) A2-papier ($42 \times 59 \text{ cm}^2$). De tafel wordt uniform verlicht met een lichtstroom van 840 lumen.

- a. Hoe groot is de verlichtingssterkte op respectievelijk het A2-papier en het resterende tafelblad?
- b. Hoe groot is de emittantie van respectievelijk het A2-papier en het resterende tafelblad?
- c. Hoe groot is de luminantie van respectievelijk het A2-papier en het resterende tafelblad?

Denk aan de eenheden en de precisie van uw berekeningen.

10. Een armatuur zendt aan de onderzijde in een ruimtehoek 0,50 steradiaal licht uit. De lichtsterkte in deze ruimtehoek is volgens het voor het armatuur geldende lichtsterkte diagram 1750 cd per 1000 lumen. De directe verlichtingssterkte in een punt van een tafelblad, 2,15 m loodrecht onder

het armatuur, is 275 lux. (Onderstel de maximale toevallige fout in de gegeven meetwaarden 1%)

- a. Hoe groot is de lichtstroom van de in het armatuur gebruikte lamp?
- b. Welk percentage van de lichtstroom van de lamp komt uit de onderzijde van het armatuur?

5.2. UITKOMSTEN

- | | |
|------------|---|
| Probleem 1 | $\Phi_{\text{door}} = 1,1 \cdot 10^5$ lumen |
| Probleem 2 | a: Vermogen per lamp: 1,51 kW
b: $I = 29$ kcd |
| Probleem 3 | a: $L = 2,8 \cdot 10^3$ cd.m ⁻²
b: $M = 9000$ lm.m ⁻² ; dan is $L/M = \pi$ |
| Probleem 4 | 87 lux. Met de algemene verlichtingsformule bereken je de juiste waarde, deze ligt ongeveer 10% lager. |
| Probleem 5 | a: Dakraam 23,6 %; Zijraam 4,8 %
$E = (23,6 + 4,8)\% \cdot 10.000$
$= 2,84$ klux
b: $E_{\text{gem}} = 1,22$ klux
c: $L_{\text{wand}} : L_{\text{hemel}} = 1 : 14,6$
d: $L_{\text{wand}} : L_{\text{hemel}} = 1 : 71$ |
| Probleem 6 | a: $R = 84$ lm.W ⁻¹
b: 4 lm.W ⁻¹ |
| Probleem 7 | a: $E = 1,12 \cdot 10^4$ lux
b: diameter 0,76 m |
| Probleem 8 | a: absolute precisie is 0,5
b: $E = 1,36 \cdot 10^3$ lux |
| Probleem 9 | a: voor beide: $E = 7,5 \cdot 10^2$ lux
b: $M_{A2} = 6,0 \cdot 10^2$ lm.m ⁻²
$M_{\text{tafel}} = 3,8 \cdot 10^2$ lm.m ⁻²
c: $L_{A2} = 1,9 \cdot 10^2$ cd.m ⁻²
$L_{\text{tafel}} = 1,2 \cdot 10^2$ cd.m ⁻² |

Probleem 10

a: $\Phi = 726 \text{ 29 lumen}$

b: 87 2 %

5.3. OM VERDER TE LEZEN EN TE KIJKEN

Handbuch für Beleuchtung. Schweizerische Lichttechnische Gesellschaft. ECOMED. 1992.

Rüdiger Ganslandt, Harald Hofmann. Handbuch der Lichtplanung. Friedr. Vieweg & Sohn, Wiesbaden. 1992.

Aanbevelingen voor Binnenverlichting. Nederlandse Stichting voor Verlichtingskunde. Arnhem, 1981.

NEN 1890 Binnenverlichting - Functionele eisen. NNI (Nederlands Normalisatie Instituut).

NEN 1891 Het meten van verlichtingssterkten en luminanties bij binnenverlichting. NNI (Nederlands Normalisatie Instituut).

Het Veiligheidsbesluit Restgroepen. NIA (Nederlands Instituut voor Arbeidsomstandigheden). 1990

ILR International Lighting Review

LICHT: Technik - Handel - Planung - Design.

LD+A Lighting Design + Application

EnergieTechniek.

A.J. Hansen, C. van Santen. Licht in de architectuur: een beschouwing over dag- en kunstlicht.

R. Visser. Verlichting en Interieur. Dekker/v.d. Bos & Partners BV, Amersfoort, 1992.

Videobanden "Architects in Europe" over Norman Forster en Henning Larsen; Videoroom TUE 1991

5.4. OVERZICHT VAN DE WEERGEGEVEN TABELLEN

Tabel I: Het elektro-magnetisch spectrum	9
Tabel II: Voorbeelden van waarden van verlichtingssterkten	13
Tabel III: Het E.M.-spectrum tussen U.V. en I.R. geeft per golflengtegebied een andere kleurindruk	17
Tabel IV: Het lichtrendement van enkele lichtbronnen	24
Tabel V: Doorlatingsfactoren voor materialen in de gebouwde omgeving	32
Tabel VI: Reflectiefactoren voor materialen in de gebouwde omgeving	33
Tabel VII: Correctiefactor voor vervuiling van daglichtopeningen. Geldig voor een schoonmaak- periode van zes maanden	46
Tabel VIII: Vereiste minimum-verlichtingssterkten volgens de klasse-indeling uit de Aanbe- velingen voor Binnenverlichting (1981)	78
Tabel IX: Klassen voor de standaardverlichtingssterkte zoals onderscheiden in de NEN Normen 1890 en 3087	79
Tabel X: Nadere specificering van de standaardverlichtingssterkte voor diverse toepassingen volgens NEN 1890	80
Tabel XI: Minimum hemelfactor (%) voor woningen (V1069)	83
Tabel XII: Minimum verhoudingen tussen raam- en vloeroppervlak voor kamers en keukens in woningen volgens de (oude) Model Bouw Verordening.	85
Tabel XIII: Overschrijdingspercentages voor alternatieve perioden. Zie figuur van Dreslers mondiaal model.	87
Tabel XIV: Belemmeringsfactor (NEN 2057) voor daglichtopeningen met een hellingshoek $\epsilon > 80^\circ$. Belemmeringshoek voor tegenoverliggende belemmeringen: α ; idem voor overstekken: β . Verkort	92