

1 | Beeldinformatie en beeldtechniek

1.1. Inleiding

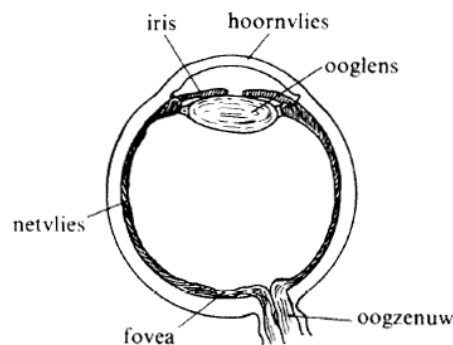
Beeldinformatie is een vorm van informatie waarmee we zeer vertrouwd zijn, immers alle informatie die ons via onze ogen bereikt behoort tot deze categorie. De mens is bijzonder goed geëquipeerd om met deze vorm van informatie om te gaan. Wij beschikken over een verbluffend groot vermogen om in beelden bepaalde structuren of patronen te ontdekken. Het is dan ook geen toeval dat zelfs bij de presentatie van informatie die van nature niet het karakter van beeldinformatie heeft, toch vaak gekozen wordt voor weergave in beeldvorm, bijvoorbeeld door middel van grafieken, histogrammen, e.d. Als we beeldinformatie technisch willen behandelen is het praktisch te beschikken over een bruikbare definitie van het begrip ‘beeld’. We zullen dit begrip definiëren als een structuur van lichtuitstralende elementen. In de meest algemene vorm is deze structuur driedimensionaal. Praktisch hebben we echter meestal met tweedimensionale structuren te maken. Ook een op het netvlies van het oog gevormd beeld is tweedimensionaal.

Beeldtechniek is zo oud als de mensheid. Reeds lang vóór er enig schriftstelsel ontwikkeld was beschikten de mensen over middelen om beelden vast te leggen. De grafische techniek heeft het lang moeten stellen met middelen die steunden op handvaardigheid, zoals tekenen, schilderen en boetsen. De komst van fotografische technieken betekende een grote doorbraak op het terrein van de beeldtechniek. Eerst ongeveer zestig jaar geleden deed de elektronica haar intrede in de beeldtechniek. De elektronische beeldtechniek heeft zich vervolgens zeer snel ontwikkeld. Een belangrijke component hierin is de televisietechniek. Maar elektronische beeldtechniek omvat meer dan alleen televisietechniek. Voorbeelden zijn systemen voor waarneming bij zeer lage lichtniveaus, facsimilesystemen, röntgenbeeldversterkers, radarweergeefsystemen, middelen en systemen voor de opslag van beeldinformatie, systemen voor de extractie van specifieke bestanddelen van de beeldinformatie, enz. De moderne elektronische beeldtechniek is een veelomvattend terrein. Niet alles kan in het bestek van dit boek aan de orde komen. De nadruk zal liggen op fundamentele aspecten, echter zonder praktisch technische aspecten uit het oog te verliezen.

1.2. Waarneming van beeldinformatie

Beeldinformatie ontleent haar betekenis in hoge mate aan het feit dat deze vorm van informatie zeer goed past bij het menselijk waarnemingsvermogen. Het uiteindelijke resultaat van op beeldinformatie uitgevoerde bewerkingsoperaties zal bijna altijd in een voor visuele waarneming geschikte vorm moeten worden gebracht. Kennis van de voornaamste eigenschappen van het visuele zintuigstelsel is dan ook onontbeerlijk voor een ieder die zich bezig houdt met beeldtechniek.

De eigenschappen van het visuele systeem worden niet alleen bepaald door de anatomische structuur van het oog, maar ook door de wijze waarop de door het oog opgenomen informatie in het centrale zenuwstelsel wordt verwerkt. In het navolgende wordt een samenvatting gegeven van de voor de beeldtechniek belangrijkste eigenschappen van het visuele zintuigstelsel.



Figuur 1.1. Opbouw van de oogbol.

De buitenste omhulling van de oogbol (figuur 1.1) wordt gevormd door een mantel van taak en stevig weefsel, dat voor het grootste deel wit is en vrijwel ondoorzichtig. In het centrum van de voorzijde bestaat de mantel uit het zeer goed transparante *hoornvlies*. Daarachter bevindt zich een kleine met een transparante vloeistof gevulde holte, waarvan de achterzijde gevormd wordt door de *iris* waarin zich het *diafragma* bevindt, waarvan de grootte zich instelt op de hoeveelheid licht die het oog bereikt. Hierachter bevindt zich de *ooglens* die naar behoefte boller of platter kan worden gemaakt, waardoor focussing op een bepaalde voorwerpafstand mogelijk is. Het brekend vermogen van het hoornvlies (cornea) bedraagt ongeveer 40 dioptrie (een dioptrie is het brekend vermogen van een lens met een brandpuntafstand van 1 meter). Het brekend vermogen van de ooglens is instelbaar tussen ca. 20 en 30 dioptrie. Het instelbereik van ca. 10 dioptrie bepaalt het zogenaamde *accomodatievermogen* van het oog. Een instelbereik van 10 dioptrie impliceert dat de kleinste afstand waarop nog scherp kan worden waargenomen 10 cm bedraagt. Het accommodatievermogen neemt af met de leeftijd. De vermindering van dit vermogen wordt aangeduid met de term presbyopie.

De binnenzijde van het oog is bekleed met het *netvlies (retina)*, dat het afbeeldingsvlak vormt waarop het door de lens gevormde beeld wordt geprojecteerd. Het netvlies is voorzien van een groot aantal lichtgevoelige cellen of *receptoren*, de *staafjes* en *kegeltjes*. Wanneer licht op deze receptoren valt, reageren ze hierop met de vorming van elektrische impulsen die worden doorgegeven aan de oogzenuw, die deze verder transporteert naar het visuele verwerkingscentrum in de hersenen. Een klein gebied, gelegen tegenover de lens, bevat uitsluitend kegeltjes die hier een zeer grote ruimtelijke dichtheid vertonen. Dit gebied heet de *fovea of gele vlek*. Het grote aantal in dit gebied aanwezige receptoren maakt een optimale waarneming van beelddetails mogelijk; de gezichtsscherpte is maximaal bij afbeelding op de fovea. In de meest voorkomende kijkomstandigheden stelt het oog zich zo in, dat afbeelding op de fovea plaatsvindt. De ruimte tussen retina en lens is gevuld met een transparante taaie massa, het zogenaamde *glasachtige lichaam*.

Van ‘constructief’ standpunt gezien kan men zeggen dat het lichtopvangende en afbeeldende deel van het gezichtsorgaan volgens betrekkelijk eenvoudige principes is opgebouwd. Zo blijkt bijvoorbeeld de compensatie van afbeeldingsfouten (astigmatisme, sferische aberratie, chromatische aberratie) allerminst perfect te zijn. Het genoemde deel, dat men technisch beschouwd als een *transducent* kan opvatten en dat in het alledaagse spraakgebruik gewoonlijk ‘het oog’ wordt genoemd, is voorzien van een groot aantal regelmechanismen ten behoeve van de aanpassing aan de in de natuur sterk wisselende omstandigheden waaronder het orgaan moet functioneren. Deze regelmechanismen zijn ieder voor zich weer vrij eenvoudig in hun werking. De eigenschappen van het orgaan als geheel doen een veel grotere perfectie vermoeden dan verklaard kan worden aan de hand van de eigenschappen van de ‘transducent’ alleen. Dit is te danken aan het zeer complexe, in het zenuwstelsel (in het bijzonder in de hersenen) gelokaliseerde informatieverwerkingssysteem, dat tal van operaties en correcties uitvoert op de ontvangen beeldinformatie. Het is vooral dit aspect van het visuele systeem dat het zijn zeer centrale functie geeft in het informatiecontact tussen de mens en zijn omgeving.

Het menselijk oog is gevoelig voor elektromagnetische straling in het golflengtegebied van ca. 350 nm ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$) tot ca. 700 nm. Elektromagnetische straling in dit golflengtegebied duidt men aan met de naam licht. Straling met de kleinste der genoemde golflengten wordt waargenomen als blauw licht, die met de grootste golflengte als rood licht. Tussentijdse golflengten worden waargenomen volgens de kleuren van het spectrum in de volgorde violet, blauw, blauwgroen, groen, geel, oranje, rood. Straling met een golflengte kleiner dan die van violet licht wordt niet door het oog waargenomen, maar men duidt straling in dit golflengtegebied toch wel aan met de naam licht en spreekt dan van ultraviolet licht. Evenzo duidt men straling waarvan de

golflengte die van rood licht overtreft, aan met de naam infrarood licht.

De natuurkunde leert dat licht ook kan worden opgevat als een stroom van deeltjes met energie $h\nu = hc/\lambda$ (h is de constante van Planck, ν de frequentie van de elektromagnetische straling, c de voortplantingssnelheid van het licht, λ de golflengte). Men spreekt van *lichtquanta* of *fotonen*. De intensiteit van een elektromagnetisch stralingsverschijnsel kan op verscheidene wijzen worden aangegeven. De meest directe methode gebruikt een vermogensgrootte, bijvoorbeeld de watt (joule per seconde).

Men kan echter ook opgeven de grootte van de elektrische (of magnetische) veldsterkte, dan wel het aantal fotonen per seconde. In het laatste geval dient uiteraard ook de frequentie van het stralingsverschijnsel te worden vermeld.

In vele gevallen zijn we vooral geïnteresseerd in de *reactie van het oog* op een aangeboden lichtprikkel. We zullen deze aanduiden met de term *lichtindruk*. Deze is groter naarmate de energie van de straling die het oog bereikt, groter is. Echter, de lichtindruk hangt niet alleen af van het vermogen van de ontvangen straling, doch ook van de golflengte. Om een bepaalde lichtindruk tot stand te brengen is een veel geringer vermogen nodig wanneer het om groen licht gaat, dan wanneer het om rood of blauw licht gaat. Blijkbaar is het oog niet even gevoelig voor licht van verschillende golflengten. Voor 'licht' buiten het zichtbare gebied is de gevoeligheid nul. Het verband tussen ooggevoeligheid en golflengte vertoont van waarnemer tot waarnemer geringe verschillen. Ook is het bij een gegeven waarnemer niet geheel constant, doch onder meer afhankelijk van de adaptatietoestand van het oog, vermoeidheidsverschijnselen en omgevingsinvloeden. Noemen we de gevoeligheid $G(\lambda)$, en stellen we deze = 1 voor de lichtsoort die, per watt lichtvermogen, de sterkste lichtindruk geeft, dan kan de lichtindruk die een hoeveelheid lichtvermogen $E(\lambda)$ opwekt, genoteerd worden als $K \cdot G(\lambda) \cdot E(\lambda)$, waarin K een nader te kiezen evenredigheidsconstante voorstelt. Deze lichtindruk blijkt een additieve grootte te zijn: de lichtindruk die twee tegelijk optredende lichtverschijnselen met golflengten λ_1 en λ_2 opwekken, is gelijk aan de som der beide afzonderlijke lichtindrukken, dus $K[G(\lambda_1)E(\lambda_1) + G(\lambda_2)E(\lambda_2)]$. Hebben we te maken met een continu spectrum, dan kunnen we dit onderverdelen in een (oneindige) reeks van infinitesimaal kleine golflengtegebiedjes $d\lambda$. Aan elke golflengte kan nu een grootte $G(\lambda)$ worden toegevoegd. De totale lichtindruk bedraagt dan

$$B(\lambda) = K \int_{\lambda=0}^{\lambda=\infty} G(\lambda)E(\lambda) d\lambda \quad (1.1)$$

Aangezien $G(\lambda)$ voor golflengten buiten het zichtbare gebied nul bedraagt, kan (1.1) ook geschreven worden als

$$B(\lambda) = K \int_{\lambda=350\text{nm}}^{\lambda=700\text{nm}} G(\lambda)E(\lambda) d\lambda \quad (1.1a)$$

Uit het voorgaande blijkt dat de lichtindruk in feite een psychologische grootheid is, welke niet toegankelijk is voor fysische metingen en daardoor niet goed bruikbaar voor numerieke en technische beschouwingen. De ingevoerde grootheid $G(\lambda)$ is namelijk geen objectieve grootheid, zij hangt immers af van de waarnemer en diens toestand.

Voor numerieke technische beschouwingen heeft men behoefte aan een objectief meetbare grootheid die met behulp van fysische meetmethoden op ondubbelzinnige wijze kan worden bepaald en die toch de gewenste analogie vertoont met de eerder beschouwde lichtindruk. Men spreekt in zo'n geval van een *psychofysische grootheid*. In het aan de orde zijnde probleem is de moeilijkheid gelegen in de onbepaaldheid van $G(\lambda)$. Hieraan ontkomt men nu door in plaats van $G(\lambda)$ een gestandaardiseerde functie in te voeren. We geven deze aan met $V(\lambda)$, de zogenaamde *internationale ooggevoeligheds-kromme*, die bepaald is door het gemiddelde te nemen van een groot aantal zorgvuldig uitgevoerde metingen van de individuele ooggevoeligheds-krommen van normale waarnemers. De aldus geobjectiveerde lichtindruk zullen we aanduiden met de naam *lichtstroom*. De grootte hiervan wordt uitgedrukt in *lumen*. Voor de lichtstroom Φ in lumen geldt aldus

$$\Phi = K \int_{\lambda=0}^{\lambda=\infty} V(\lambda)E(\lambda) d\lambda \quad (1.2)$$

waarin $E(\lambda)$ in watt is uitgedrukt en de constante K de waarde 680 lumen per watt heeft.

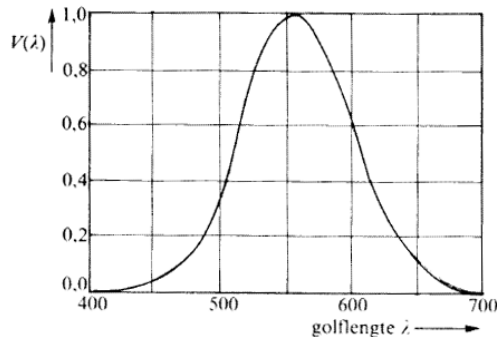
Opmerking

De keuze van deze constante is in wezen arbitrair. Men heeft de bovengenoemde waarde gekozen op grond van de eigenschappen van een bij de invoering van de definitie volgens (1.2) reeds algemeen gebruikte standaardlichtbron.

$V(\lambda)$ ligt vast als de aanvaarde internationale ooggevoeligheds-kromme, zoals aangegeven in figuur 1.2.

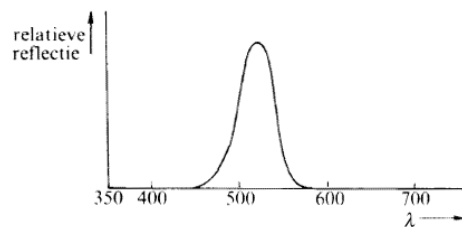
1.3. Waarneming van licht uitstralende objecten; helderheid en luminantie

Licht dat het oog bereikt is afkomstig van een primaire of secundaire lichtbron. Met de eerste bedoelen we een actieve producent van elektromagnetische straling, met de tweede een (passieve) reflector van zulke straling. Het oppervlak van elk stoffelijk lichaam reflecteert een deel van de straling en absorbeert een ander deel daarvan. Een lichaam heet transparant als de absorptie zo gering is dat aan de niet-belichte zijde een deel van het niet-gereflecteerde licht weer uittreedt. Voor de meeste stoffelijke objecten geldt dat hun reflectie, absorptie en transmissie afhangen van de golflengte. Het



Figuur 1.2. Internationale ooggevoeligheidskromme.

verband tussen golflengte en reflectiefactor noemt men de *spectrale remissiekromme*. Treedt aan een oppervlak voor alle golflengten volledige of nagenoeg volledige reflectie op, dan spreekt men van een *wit* oppervlak; is de reflectie voor alle golflengten nul of nagenoeg nul, dan noemt men het oppervlak *zwart*. Is de reflectie onvolledig, doch onafhankelijk van de golflengte, dan heet het oppervlak *grijs*. Is de spectrale remissiekromme niet vlak, dan spreekt men van een *gekleurd* oppervlak. Is de reflectie sterk voor langgolvig licht, doch gering voor kortgolvig licht, dan nemen we het oppervlak als rood waar, in het tegengestelde geval als blauw, enz. Figuur 1.3 geeft een voorbeeld van een spectrale remissiekromme voor een oppervlak dat bij bestraling met wit licht als groen wordt waargenomen.

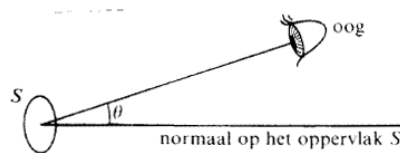


Figuur 1.3. Voorbeeld van een spectrale remissiekromme.

Onverschillig of een primair of secundair stralend object ongekleurd dan wel gekleurd licht uitstraalt, steeds zal het oog bij de waarneming een lichtstroom ontvangen. Naarmate per eenheid van oppervlak van het object een grotere hoeveelheid licht het oog van de waarnemer bereikt, doet het betreffende deel van het object helderder aan. Men definieert de *helderheid* van een object in een bepaalde richting nu als de hoeveelheid licht die het per eenheid van oppervlak in die richting uitstraalt. De eigenschappen van de individuele waarnemer kan men weer uitschakelen door gebruik te maken van de internationale ooggevoeligheidskromme. Daarmee gaat de genoemde (subjectieve) grootte *helderheid* over in een objectieve fysisch meetbare grootte, die men aanduidt met de naam *luminantie*.

Zij de oppervlakte van een licht uitstralend object S en zij θ de hoek waaronder dit oppervlak wordt waargenomen door het oog (figuur 1.4). De schijnbare of effectieve oppervlakte in de kijkrichting bedraagt dan $S \cos \theta$. Zij verder $E(\lambda)$ het uitgestraalde vermogen bij de golflengte λ . In het algemeen zal het vermogen in alle richtingen uitgestraald worden. Voor de helderheidsindruk is van belang de concentratie van de straling in de richting van het oog, dat wil zeggen het stralingsvermogen per eenheid van ruimtehoek ω , dus $E(\lambda)/\omega$. De per eenheid van (schijnbaar) oppervlak en per eenheid van ruimtehoek uitgestraalde energie is nu bepalend voor de helderheidsindruk. Op grond hiervan definiëren we de luminantie als

$$L = K \int_{\lambda=0}^{\lambda=\infty} V(\lambda) \frac{E(\lambda)}{\omega S \cos \theta} d\lambda \quad (1.3)$$



Figuur 1.4. Bij de definitie van het begrip luminantie.

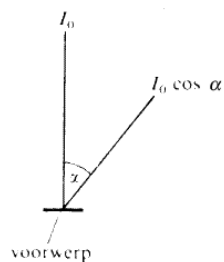
Kiezen we weer $K = 680$ lumen per watt, dan vinden we L in *stilb* of *candela per cm²*. Men drukt de luminantie ook wel uit in *candela per m²* of *nit* = 10^{-4} candela/cm². In de Amerikaanse literatuur wordt de luminantie dikwijls in *foot-lambert* = $3,426 \times 10^{-4}$ candela per cm² opgegeven.

Uit het voorgaande blijkt dat de luminantie van een lichtuitstralend oppervlak een eigenschap van dat oppervlak is, die onafhankelijk is van de wijze van waarnemen of meten. Enkele numerieke gegevens kunnen een indruk geven van de grootteorde van de genoemde luminantie-eenheden. De luminantie van de zon wanneer deze in het zenit staat, bedraagt ca. $16,5 \times 10^4$ stilb, die van de maan bij heldere hemel ca. 0,76 stilb, die van het scherm van een weergeefbuis voor televisie ca. 0,06 stilb, bij filmprojectie bedraagt de luminantie van het scherm ca. 0,003 stilb. De lumen kan worden beschouwd als de fundamentele fotometrische grootheid waarvan de definitie direct is gerelateerd aan het betrokken stralingsvermogen. Alle overige fotometrische grootheden kunnen hieruit worden afgeleid. Hoewel we in dit boek geen directe behoefte hebben aan andere begrippen dan de *lichtstroom* (eenheid lumen) en de *luminantie* (eenheid stilb), volgen hier ter wille van de volledigheid nog de definities van de belangrijkste overige fotometrische grootheden.

De *lichtsterkte* (Eng. *luminous intensity*) van een licht uitstralend voorwerp in een bepaalde richting wordt gedefinieerd als de lichtstroom per eenheid van ruimtehoek in die richting of, wat op hetzelfde neerkomt, als het produkt van luminantie en oppervlakte

(in cm^2) in die richting. De eenheid is derhalve *lumen per sterrediaal* of *candela*. De candela is dus de lichtsterkte van een vlakje van 1 cm^2 met luminantie 1 stilb. De *verlichtingssterkte* (Eng. *illuminance*) van een vlakje is de hoeveelheid licht die het per m^2 ontvangt. De eenheid is derhalve *lumen per m^2* of *lux*.

De door een voorwerp uitgestraalde hoeveelheid licht per eenheid van ruimtehoek (dat is de lichtsterkte van dat voorwerp) is in het algemeen een functie van de richting. Een belangrijk en (althans bij benadering) veel voorkomend geval is dat de lichtsterkte I cosinusvormig afhangt van de richting, dus $I = I_0 \cos \alpha$, als I_0 de lichtsterkte voorstelt in de richting loodrecht op het lichtende oppervlak (figuur 1.5). Gemakkelijk leidt men af dat voor een lichtend vlakje dat aan deze zogenaamde *cosinuswet van Lambert* voldoet, geldt dat de luminantie in alle richtingen dezelfde is. Zuiver diffuus reflecterende oppervlakken en ook schermen van weergeefbuizen voldoen met goede benadering aan deze wet.



Figuur 1.5. Lichtsterkte als functie van de richting (wet van Lambert).

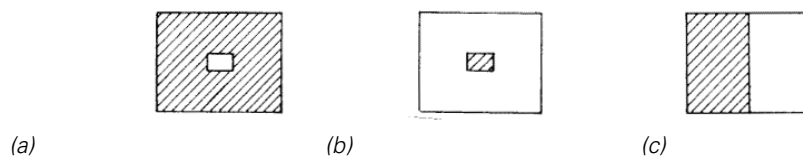
Praktisch hebben we gewoonlijk niet te maken met een geïsoleerd lichtreflecterend object, doch met een samenstel van vele objecten of delen daarvan. We zullen in zo'n geval spreken van een *scène*. Wordt een scène volkomen gelijkmatig verlicht en bestaat de scène uitsluitend uit diffuus reflecterende objecten, dan treedt de maximaal mogelijke luminantie op in die delen die volledig het opvallende licht reflecteren. In vele gevallen zijn we nu in hoofdzaak geïnteresseerd in de verhoudingen der luminanties van de delen der scène, niet in de absolute grootten daarvan. Het is dan doelmatig de maximale luminantie = 1 te stellen en de minimale = 0. Laatstgenoemde treedt op in die delen van de scène die in het geheel geen licht reflecteren.

1.4. Contrast

Een scène zal in het algemeen delen omvatten van zeer verschillend luminantieniveau. Geven we de hoogste luminantiewaarde die in de scène voorkomt aan met L_{\max} , de laagste met L_{\min} , dan noemen we de verhouding L_{\max}/L_{\min} de *contrastomvang* van de scène. Zou in de scène een deel voorkomen dat in het geheel geen licht reflecteert, dus een ideaal zwart, dan zou de contrastomvang oneindig zijn. Ideaal zwarte delen komen

in natuurlijke scènes niet voor, zodat de contrastomvang steeds een eindige waarde heeft. De sterkst reflecterende voorwerpen, dit zijn voorwerpen die we waarnemen als helder wit, reflecteren zelden meer dan 80 à 90% van het opvallende licht; als diep zwart beoordeelde voorwerpen reflecteren in werkelijkheid steeds nog ca. 4% van het opvallende licht. Bij egale belichting zal dus de contrastomvang 20 à 25 bedragen. Deze situatie doet zich onder andere voor bij foto's. De verschillen in transparantie van voorwerpen kunnen aanzienlijk groter zijn; in een goed diapositief laten de donkere delen minder dan 1% van het opvallende licht door, zodat hier de contrastomvang gemakkelijk ca. 100 kan bedragen. Is de verlichting niet gelijkmatig, dan is de contrastomvang van de verlichte scène gelijk aan de verhouding der reflectiefactoren vermenigvuldigd met de verhouding der voorkomende verlichtingssterkten. In een door zonlicht beschenen landschap kan de verhouding tussen de verlichtingssterkten in het volle licht en in de schaduw gemakkelijk 100 bedragen, zodat de contrastomvang van de scène ca. 2500 kan bedragen. Weergeefsystemen van welke aard ook (fotografie, film, televisie) leveren een veel kleinere contrastomvang op. Dit betekent dat bij het weergeven van zeer contrastrijke scènes aanpassing van de contrastverhoudingen nodig is. De totale contrastomvang van de oorspronkelijke scène moet daartoe op een passende wijze gecomprimeerd worden tot die van het weergeefstelsel.

Behalve van de verlichtingsverhoudingen en van de reflecterende eigenschappen van de voorwerpen die deel uitmaken van de scène, hangt het contrast ook af van de inhoud van de scène. De oorzaak hiervan is gemakkelijk te begrijpen aan de hand van twee extreme gevallen. Beschouwen we eerst een scène bestaande uit een groot zwart vlak met daarin een klein wit vlakje (figuur 1.6a). De totale hoeveelheid gereflecteerd licht is dan gering en daarmee ook het bij de reflectie optredende strooilicht, dat op de weinig reflecterende delen van de scène terecht komt en daardoor het contrast bederft. Hebben we echter een groot wit vlak met in het midden een klein zwart vlakje (figuur 1.6b), dan zal dit zwarte vlakje sterk belast worden met strooilicht ten gevolge van de sterke reflectie van de witte omgeving. Het contrast kan hierdoor aanzienlijk afnemen. Om deze reden maakt men onderscheid tussen *totaalcontra*st en *detailcontra*st. Een geschikte beeldinhoud voor het meten van het detailcontrast van bijvoorbeeld een weergeefstelsel, is die volgens figuur 1.6b. Voor de meting van het totaalcontrast



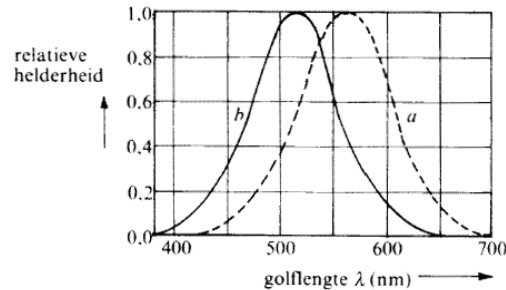
Figuur 1.6. Contrastsituaties. (a) Wit detail in zwart vlak, (b) zwart detail in wit vlak; geschikt voor meting van detailcontrast, (c) de helft van het beeldvlak is wit, de andere helft zwart; geschikt voor meting van totaalcontrast.

maakt men gewoonlijk gebruik van een beeldinhoud als geschetst in figuur 1.6c. In beide gevallen meet men de luminantie in de zwarte en de witte delen en bepaalt dan de verhouding der gemeten waarden.

1.5. Fotopisch en skotopisch zien, Purkině-verschuiving

Het menselijk oog is in staat tot lichtwaarneming over een zeer groot bereik van luminantieniveaus. De eigenschappen van de waarneming zijn echter niet onafhankelijk van het luminantieniveau. De voornaamste oorzaak hiervan is dat het netvlies van het oog is uitgerust met twee typen receptoren, te weten staafvormige receptoren, kortweg *staafjes* (Eng. *rods*) en kegelvormige receptoren, kortweg *kegeltjes* (Eng. *cones*). Bij zeer lage lichtniveaus zijn alleen de staafjes werkzaam, bij middelmatige en hoge lichtniveaus worden de eigenschappen van het zien bepaald door de kegeltjes. Het zien bij lage lichtniveaus duidt men wel aan met de naam *skotopisch zien* (Grieks *skotos* = duisternis); bij de hogere lichtniveaus spreekt men van *fotopisch zien* (Grieks *phos* = licht). De eigenschappen van het skotopisch zien worden bepaald door de staafjes, die van het fotopisch zien door de kegeltjes. Een zeer karakteristiek verschil is dat de kegeltjes kleuren kunnen onderscheiden, de staafjes niet. In bijvoorbeeld maanlicht kunnen wij geen kleuren onderscheiden ('in het donker zijn alle katjes grauw'). Menigeen is zich dit nauwelijks bewust, ten gevolge van de neiging om de ontbrekende informatie automatisch aan te vullen met gegevens uit de herinnering. Ook verschilt de ooggevoeligheidskromme in het skotopische gebied van die in het fotopische gebied. De ooggevoeligheidskromme die wij hebben leren kennen, heeft betrekking op het fotopische gebied dat alle normaal bij daglicht en kunstlicht optredende lichtniveaus omvat. De top van de door de staafjes bepaalde skotopische ooggevoeligheidskromme is aanzienlijk verschoven in de richting van het kortgolvlige (blauwe) deel van het spectrum. Figuur 1.7 illustreert dit verschil. Naar de Tsjechische fysioloog die als eerste het verschijnsel heeft beschreven, wordt dit verschijnsel wel *Purkině-effect* genoemd. Men kan het gemakkelijk waarnemen, in het bijzonder bij luminantieniveaus in het overgangsg gebied tussen staafjes-zien en kegeltjes-zien, waar beide receptoren bijdragen tot de waarneming, zodat ook kleuren nog worden herkend. Zeer duidelijk manifesteert het effect zich wanneer men in een tuin de kleuren van bloemen en bladeren observeert tijdens het invallen van de schemering; blauwe bloemen blijken dan later hun helderheid te verliezen dan rode en gele.

Ook in andere opzichten blijken de eigenschappen van het oog in het skotopische gebied af te wijken van die in het fotopische gebied, zoals bijvoorbeeld de gezichts-scherpte en het vermogen om contrasten te onderscheiden. De definitie van laatstgenoemde grootheden komt ter sprake in de volgende paragrafen.



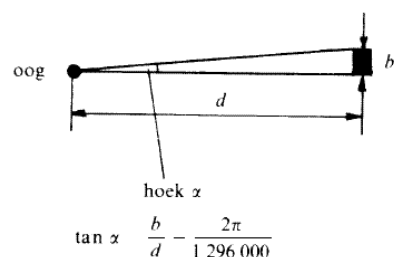
Figuur 1.7. Vergelijking van de skotopische ooggevoeligheid (kromme b) en de fotopische ooggevoeligheid (kromme a).

1.6. Gezichtsscherpte

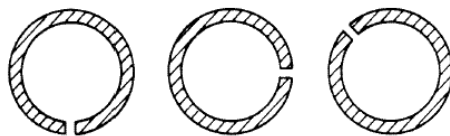
Het vermogen van het oog om ruimtelijk van elkaar gescheiden in het gezichtsveld gelegen objecten te onderscheiden, duiden we aan met de term *gezichtsscherpte*. Deze is beperkt, onder andere door de anatomie van het oog. De ooglens is geen ideaal afbeeldingsinstrument en het netvlies bevat een eindig aantal lichtgevoelige receptoren (staafjes en kegeltjes). Het totaal aantal receptoren bedraagt meer dan 10^8 , doch het aantal zenuwdraden in de oogzenuw is aanzienlijk geringer, waarschijnlijk in de orde van 800 000. Blijkbaar zijn groepen receptoren verbonden met dezelfde zenuwvezel. De gezichtsscherpte hangt overigens af van vele factoren, onder andere de adaptatietoestand van het oog, de vermoeidheid van de waarnemer, de kleur der waargenomen objecten en het luminantieniveau. In het skotopische gebied is de gezichtsscherpte aanzienlijk geringer dan in het fotopische gebied. We zullen ons beperken tot het laatstgenoemde gebied.

Een moeilijkheid bij de bepaling van de gezichtsscherpte is voorts dat deze ook afhangt van de vorm van het waar te nemen object. Een zwarte lijn op een witte achtergrond is onder gunstige omstandigheden reeds waarneembaar als de breedte, uitgedrukt in hoekmaat, ca. $1/2$ boogseconde bedraagt, dat wil zeggen zo'n lijn met een breedte b van 1 mm zou reeds worden waargenomen op een afstand d van ca. 400 m (figuur 1.8). Dit is echter geen reële maatstaf voor de gezichtsscherpte. De zeer goede zichtbaarheid van de lijn is namelijk te danken aan het feit, dat de lijn in feite reeds herkend wordt als slechts enkele punten met zekerheid worden waargenomen, met andere woorden het beeld van de volledige lijn bevat een grote hoeveelheid overmaat aan informatie (zogenaamde *redundantie*). Een betere maatstaf voor de gezichtsscherpte is de kleinste hoek waaronder een object met gelijke afmetingen in horizontale en verticale richting kan worden waargenomen. Een algemeen gebruikt testobject is de zogenaamde *ring van Landolt*. Dit is een ring die op één plaats onderbroken is (figuur 1.9). De onderbreking fungeert als het eigenlijke testobject. De waarnemer wordt nu gevraagd van een aantal verschillend georiënteerde ringen aan te geven waar zich de

opening bevindt. Men bepaalt dan de kijkafstand waarbij 50% van de openingen op de juiste wijze wordt waargenomen. Is de breedte van de opening b en de aldus bepaalde kijkafstand d , dan is de gezichtsscherpte gedefinieerd als de hoek α , waarbij $\tan \alpha = b/d$. De op deze wijze bepaalde gezichtsscherpte blijkt ca. 1 boogminuut te bedragen. Zij vertoont overigens belangrijke individuele verschillen en hangt onder meer sterk af van de leeftijd van de waarnemer. Bij het klimmen der jaren neemt de gezichtsscherpte aanzienlijk af. De genoemde waarde van 1 boogminuut wordt algemeen als rekengrootte gebruikt voor berekeningen, die betrekking hebben op situaties waarin beschikt moet worden over een numerieke maat voor de gezichtsscherpte.



Figuur 1.8. Zichtbaarheid van een zwarte lijn in een wit veld.



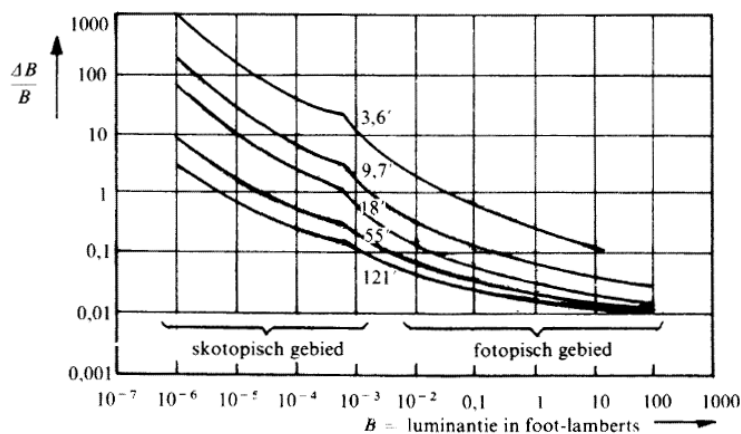
Figuur 1.9. Ringen van Landolt.

1.7. Onderscheidingsvermogen voor helderheidscontrasten

In de vorige paragraaf kwam het onderscheidend vermogen van het oog voor de ruimtelijke aspecten van het waargenomen beeld ter sprake. We moeten ons nu bezighouden met een tweede aspect van het onderscheidend vermogen, namelijk het waarnemen van helderheidsverschillen. Meer algemeen geformuleerd kan deze vraag teruggebracht worden tot die naar het verband tussen de (fysisch meetbare) intensiteit van een zintuigprikkel (stimulus) en de als gevolg daarvan optredende zintuigreactie. Hierover is veel onderzoek verricht, waaraan in het bijzonder de namen zijn verbonden van *E.H. Weber* (1795 – 1878) en *G.T. Fechner* (1801 – 1887). Het onderzoek bracht aan het licht dat in het algemeen het verband tussen prikkel en gewaarwording logaritmisch is. Er is een bepaalde minimumtoename van de prikkel nodig om een juist waarneembare toename van de zintuigreactie tot stand te brengen. Men noemt dit het *juist waarneembare prikkelverschil*. We zullen dit voortaan aangeven met de afkorting JND (*just noticeable difference*). Op grond van het genoemde logaritmische verband is het JND een vast percentage van de prikkel, de absolute waarde van het JND neemt dus

toe met het prikkelniveau. Het JND voor de helderheidsstimulus blijkt geen vaste waarde te hebben, doch afhankelijk te zijn van het algemene helderheidsniveau, hetgeen in feite een afwijking impliceert van het zuiver logaritmische verband over het gehele contrastbereik van het gezichtszienuig, dat we in het vervolg kortweg zullen aanduiden met de term 'het oog'. Bovendien blijkt het JND af te hangen van de afmetingen van het waargenomen object. Figuur 1.10 toont het resultaat van door Blackwell (Ref. 1.1) uitgevoerde metingen over het JND als functie van het helderheidsniveau en de in boogminuten gemeten afmeting van het waargenomen object. Uit figuur 1.10 blijkt dat het minimaal waarneembare contrastverschil in het skotopische gebied veel groter is dan in het fotopische gebied. Bovendien blijkt dat het voor grote objecten (2°) aanzienlijk kleiner is dan voor kleine objecten ($3,6'$). Voor een object van $55'$, (dus ca. 1°) is in het skotopische gebied een toename van de helderheid van ca. 100% nodig om een juist waarneembaar verschil te produceren. Dit betekent dat in een beeld waarvan de contrastomvang 50 bedraagt, het aantal onderscheidbare helderheidsniveaus (het aantal JND's + 1), $1 + \log 50 / \log 2$ bedraagt, dit is ca. 7 niveaus. In het fotopische gebied geldt voor een object van dezelfde omvang dat het JND ca. 2% bedraagt. Het aantal onderscheidbare helderheidsniveaus bedraagt nu $1 + \log 50 / \log 1,02 \approx 200$.

Deze wetenschap heeft een belangrijke praktische consequentie. Gaat het bij de interpretatie van een gegeven beeld vooral om het onderscheiden van kleine contrastverschillen, dan moet er naar gestreefd worden de luminantie van het beeld zo groot te doen zijn dat waarneming in het fotopisch gebied bereikt wordt. Voldoet de primair beschikbare beeldinformatie niet aan deze eis, dan dient men een passende versterking van de intensiteit te realiseren. De mogelijkheden deze tot stand te brengen met behulp van elektronische middelen komen later aan de orde. Belangrijke voorbeelden van beeldinformatie waarbij de contrastverhoudingen van grote betekenis zijn, vindt men in de röntgentechniek.



Figuur 1.10. Minimaal waarneembare luminantieverschillen voor 90% trefzekerheid (naar Blackwell, Ref. 1.1). $\Delta B/B$ = minimaal waarneembaar relatief luminantieverschil.

1.8. Onderscheidingsvermogen voor kleurverschillen

Verschilt de spectrale samenstelling van twee lichtsoorten, dan zullen in het algemeen de waargenomen kleuren verschillen. Dit levert een derde discriminerende eigenschap van het oog op. Het verschijnsel kleur en de waarneming daarvan vereist een aparte behandeling. We stellen deze voorlopig uit, daar vele in de praktische beeldtechniek voorkomende situaties betrekking hebben op éénkleurige (zogenaamde monochrome) beelden. We volstaan hier met de opmerking dat het discriminerend vermogen van het oog voor kleurverschillen aanzienlijk is. Later zal blijken dat het aantal gescheiden waar te nemen kleuren het aantal gescheiden waar te nemen helderheidsniveaus belangrijk overtreft.

1.9. Onderscheidend vermogen voor variaties in de tijd

Het vierde en laatste aspect van het discriminerend vermogen van het oog heeft betrekking op variaties van de aangeboden beeldinformatie *in de tijd*. Bieden we het oog een reeks in de tijd gescheiden lichtprikkels aan en verkleinen we de tijdsruimte tussen de prikkels, dan blijkt dat beneden een bepaalde tijdsruimte de prikkels niet gescheiden worden waargenomen. Er vindt dan versmelting plaats. Zolang dit niet het geval is, waardeert het oog het intermitterende licht als flikker, die in het algemeen als hinderlijk wordt ondervonden. De frequentie waarbij nog juist flikker wordt waargenomen, noemt men de kritische flikkerfrequentie. Deze is individueel verschillend en hangt bovendien af van verscheidene karakteristieke grootheden van de aangeboden reeks lichtprikkels. Met name dienen te worden genoemd de intensiteit van het licht (bij toenemende intensiteit neemt de kritische flikkerfrequentie toe), de 'duty-cycle' van de pulsreeks en trouwens algemeen de vorm van de functie die het verloop van de intensiteit in de tijd beschrijft, de grootte van het gezichtsveld en de plaats op het netvlies die door het licht wordt getroffen (aan de periferie van het netvlies is de kritische flikkerfrequentie hoger dan in het centrum). Voor helderheidsniveaus in het fotopische gebied ligt de kritische flikkerfrequentie in de regel tussen 50 en 70 perioden per seconde. De kritische flikkerfrequentie is een maat voor de traagheid van het oog, of anders gezegd: voor de persistentie van de lichtindruk.

Het (hinderlijke) flikkereffect wordt alleen waargenomen bij periodieke stimuli. Langzaam verlopende, niet periodieke intensiteitsvariaties, zoals die in natuurlijke scènes voorkomen, geven geen aanleiding tot flikkereffecten.

1.10. Beeldtechniek in verband met de eigenschappen van het oog

In het voorgaande zijn verschillende aspecten van het discriminerend vermogen van het menselijke visuele zintuig aan de orde gekomen. Zij zijn in tweeërlei opzicht van belang voor de beeldtechniek. In de eerste plaats bepalen ze de eisen die moeten worden

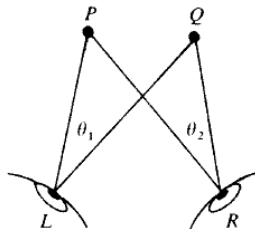
gesteld aan op beeldtechniek gebaseerde waarnemingssystemen en de daarmee verbonden systemen voor signaalbehandeling. Zo is bijvoorbeeld de gezichtsscherpte een maatstaf voor het aantal afzonderlijke beeldelementen waaruit een weergegeven beeld moet zijn opgebouwd. De JND voor luminantieverschillen is een beslissende grootte voor de vereiste minimale signaal-ruisverhouding; immers, ruisamplituden die kleiner zijn dan de JND leiden niet tot waarneembare ruisverschijnselen. De kritische flikkerfrequentie is een bepalende grootte voor de verversingssnelheid van weer te geven beeldinformatie. Met betrekking tot deze laatste grootte is het van belang te weten dat zij afhangt van het luminantieniveau: heldere beelden vragen om een hogere verversingssnelheid.

In de tweede plaats geven de discriminerende eigenschappen van het oog aanleiding tot de formulering van eisen met betrekking tot speciale beeldtechnische systemen. Zo is het bijvoorbeeld van belang te weten dat het discriminerend vermogen in het fotonische gebied veel beter is dan in het skotonische gebied. Ongeacht het luminantieniveau van de oorspronkelijke beeldinformatie moet bij de weergave een fotonisch presentatieniveau worden nagestreefd. Op grond hiervan bestaat er behoefte aan systemen voor versterking van het lichtniveau. Dit is onder andere van belang bij nachtzichtapparatuur en bij de presentatie van röntgenbeelden. Het eindige discriminerend vermogen voor luminantiecontrasten kan aanleiding zijn tot het streven naar contrastexpansie van bepaalde delen van de beeldinformatie. De eindige gezichtsscherpte kan aanleiding zijn tot de wens beelddetails vergroot weer te geven en het beperkte vermogen tot discriminatie van temporele variaties kan aanleiding zijn tot het ontwikkelen van systemen waarin tijdexpansie gerealiseerd wordt ('slow motion'). Dit alles stelt nog eens het belang in het licht van kennis over de eigenschappen van het visuele zintuigstelsel.

1.11. Ruimtelijk zien; beperking tot vlakke beelden

In paragraaf 1.1 hebben we een *beeld* gedefinieerd als een structuur van optische elementen, waarin de geometrische samenhang een essentiële functie heeft. In het meest algemene geval heeft het beeld een driedimensionale structuur. Fungeert dit als informatiebron, dan wordt de informatie bepaald door de optische emissie van elk punt in dit ruimtelijke beeld. Het gezichtsorgaan beschikt over vele hulpmiddelen die het in staat stellen tot ruimtelijke waarneming. Het belangrijkste hulpmiddel is de analyse van het onderlinge verschil der door beide ogen waargenomen beelden. Figuur 1.11 illustreert de situatie. Het linkeroog L ziet de afstand tussen de punten P en Q onder een hoek θ_1 , het rechteroog R onder een hoek θ_2 . Het is gebleken dat een verschil van 2 boogseconden tussen beide hoeken reeds voldoende is om het diepteverschil waarneembaar te maken. De op deze wijze verkregen informatie wordt aangevuld met gegevens ontleend aan de accommodatietoestand van het oog (scherpstelling van de

ooglenzen), veranderingen in het waargenomen beeld bij geringe oogverplaatsing en met in het geheugen beschikbare gegevens over de grootteverhoudingen van bekende objecten. Hieruit blijkt wel dat voor het technisch vastleggen van een ruimtelijk beeld het vormen van vlakke afbeeldingen van twee verschillende posities uit, in feite niet toereikend is. Volledig vastleggen van het ruimtelijke beeld vereist het vastleggen van alle informatie die aanwezig is in de golffronten der door het beeld uitgestraalde lichtgolven. De recente ontwikkeling der zogenaamde *holografie* heeft dit mogelijk gemaakt. Ter beperking van ons studieterrain zullen we het onderwerp der ruimtelijke beeldanalyse en -reconstructie verder buiten beschouwing laten. We zullen ons derhalve beperken tot tweedimensionale beelden.



Figuur 1.11. Binoculair zien.

De volledige beschrijving van de optische emissie van elk punt in een tweedimensionaal beeld omvat opgave van de eerder gedefinieerde *luminantie* daarvan en de *kleur*, welke laatste bepaald wordt door de verdeling van de geëmitteerde straling over het spectrum. In vele voor de praktische toepassing van elektronische beeldtechnieken belangrijke situaties gaat het om éénkleurige (zogenaamde monochrome) beelden. In deze gevallen wordt het beeld geheel bepaald door de luminantieverhoudingen. In andere gevallen vormt naast de luminantie, de kleur mede een essentieel bestanddeel van de beeldinformatie. Om de behandeling van ons onderwerp overzichtelijk te houden zullen we ons voorlopig beperken tot beelden die uitsluitend door hun luminantie zijn gekenmerkt. In een later stadium komt dan eerst de kleurenleer, vervolgens de verwerking van kleurinformatie ter sprake.

Opmerking

Men verwarre het begrip *monochroom* (éénkleurig) niet met het begrip *monochromatisch*, dat betekent: uit slechts één spectrale lichtsoort bestaande. Op de betekenis van dit onderscheid komen we terug in het hoofdstuk over kleurenleer.

Voor een verdergaande bestudering van de in dit hoofdstuk ter sprake gekomen onderwerpen bieden de meeste handboeken op het gebied van de optica en van de televisietechniek ruimschoots materiaal. Het meest uitgebreide handboek van de TV-techniek is Ref. 1.2. Dit boek dateert van 1957, maar voor onderwerpen als het

onderhavige is het nog steeds een bruikbare bron van gegevens.

Een goed overzicht van de eigenschappen van het zien in verband met technische weergeefsystemen is te vinden in Part I van het als Ref. 1.3 vermelde handboek.

Ref. 1.1. H.R. Blackwell, *Contrast thresholds of the human eye*, Journal of the Optical Society of America, 36, (1946), pp. 624-643.

Ref. 1.2. D.G. Fink, e.a., *Television Engineering Handbook*, McGraw Hill, New York, 1957, hoofdstuk 3.

Ref. 1.3. D. Bosman (editor), *Display Engineering*, North Holland, Amsterdam, 1989.