



MUNUS VEHENTIBUS OMNIA VIDERE

EXTRA



DECEMBER 2018

Please note: Due to serious health problems, Ruurd Groot has been incapacitated since March 2nd 2018, and will be so until further notice.

All material on the website is normally accessible, but this *extra* frontpage with information will be temporarily added to all files (downloaded or opened online).

You can simply remove this extra page in most applications handling PDF files.

For **questions or comments** please contact Mieke Groot <mieke@iwacc.com>.

(Max van Kelegom has abandoned Verkeer-Zien on March 2nd 2018.)

Nota bene: Ernstige gezondheidsklachten hebben Ruurd Groot sinds 2 maart 2018 voorlopig uitgeschakeld.

Al het materiaal op de website is gewoon toegankelijk, maar aan de (gedownloade of online geopende) bestanden is tijdelijk dit *extra* voorblad toegevoegd.

In de meeste applicaties voor pdf-bestanden kan dit extra blad verwijderd worden.

Neem voor **vragen of commentaar** contact op met Mieke Groot <mieke@iwacc.com>.

(Max van Kelegom heeft Verkeer-Zien op 2 maart 2018 in de steek gelaten.)

Kontrast en de waarneembaarheid
van lineaire luminanties

[eerste verbeterde versie]

IWACC # 8585

Voorwoord

Deze tekst is niet voor publikatie, maar bedoeld als interne achtergrondinformatie voor hen die met ons betrokken zijn bij de wielcirkelproblematiek. Het contrast en de waarneembaarheid van lineair luminante vormen is essentieel in die problematiek. Ook in voor de toekomst voorziene projekten zal lineaire luminantie een belangrijke rol spelen.

Het wiskundige deel van deze tekst moet beschouwd worden als een zeer schetsmatige beschrijving aan de hand van een zeer vereenvoudigd fysisch model. Voor een snelle behandeling was dit onvermijdelijk, maar het gevolg is dat de afleidingen niet volstrekt coherent zijn. Dit betreft vooral de samenhang tussen de aangehaalde MTF (Modulation Transfer Function), de verlichtingssterkte op het netvlies en wat hier "flanksteilte" wordt genoemd.

augustus 1985

Kontrast en de waarneembaarheid van
lineaire luminanties

[eerste verbeterde versie]

A. ALGEMENE INLEIDING

A.1. onderscheid en contrast

Een detail (deel, vorm, plek, target, stimulus) in een visuele omgeving (omgevingstafereel, distaal* tafereel) moet zich van de onmiddellijk aangrenzende omgevingsdelen (lokale achtergrond) voldoende onderscheiden om gezien te kunnen worden. Het betreffende onderscheid wordt "kontrast" genoemd; het minimaal benodigde contrast in de gegeven situatie heet "drempelkontrast".

A.2. licht en donker

Een van de belangrijkste soorten contrast is het onderscheid in "lichtheid". Onder omstandigheden met een laag verlichtingsniveau is dit soort contrast zelfs het belangrijkste. Voldoende onderscheid in lichtheid wil zeggen dat het betreffende detail duidelijk lichter (positief contrast) of donkerder (negatief contrast) gezien wordt dan de aangrenzende achtergrond.

A.3. fotometrie en waarnemen

Het is moeilijk "lichtheid" psychofysisch, laat staan fysisch goed te definiëren. Met behulp van de fotometrische begrippen is een goede benadering mogelijk, die de betreffende visuele verschijnselen redelijk beschrijfbaar maakt. Aldus beschreven komen resultaten met verschillende proefpersonen aanvaardbaar overeen, en zo wordt het zelfs mogelijk "wetmatigheden" te formuleren.

Vertaling naar de "werkelijkheid" blijft moeilijk, o.a. wegens de enorme variatie in vormen en achtergronden, wegens fysiologische verschillen tussen waarnemers, wegens fysiologische aanpassing (adaptatie) van het waarnemingsapparaat aan de omstandigheden, en wegens "psychologische" invloeden, zoals door taak, motivatie en ervaring van de waarnemer.

A.4. fotometrie en "licht"

Licht wordt gedefinieerd als de eigenschap van bepaalde vormen van elektromagnetische straling, om bij een waarnemer een visuele indruk op te roepen. De mate waarin bepaalde golflengten (of omgekeerd evenredig daarmee: frekwenties) die eigenschap bezitten kan in psychofysische experimenten worden bepaald; uitkomsten bij proefpersonen zijn niet identiek: men middelt tot een "standaardwaarnemer". Zo wordt een relatieve schaal bepaald, die aangeeft hoe de "zichtbare" golflengten (frekwenties) zich onderling verhouden in hun vermogen tot het

* distaal: d.w.z. behorend tot de buitenwereld, gedefinieerd in termen van de buitenwereld.

oproepen van een visuele indruk. Gegeven deze verhoudings-schaal is het mogelijk te berekenen hoeveel watt van golflengte λ t.a.v. vermogen tot lichtindruk overeenkomt met een bepaalde hoeveelheid watt van golflengte λ .

In feite zijn er twee relatieve schalen; een die geldt voor sterke lichtverschijnselen en een die geldt voor zeer donkere omstandigheden en zwakke lichtverschijnselen. Voor de verkeerspraktijk is de eerste of fotopische schaal het belangrijkste.

Achterliggende oorzaak is het bestaan van twee zintuiglijke detektorssystemen. Het fotopische apparaat bestaat uit "kegeltjes" onderin het netvlies en maakt kleurenzien mogelijk. Bij zeer zwak licht nemen de "staafjes" over; dan gelden de regels van het skotopische zien. Scherp zien gebeurt centraal, in de "fovea". Daar bevinden zich uitsluitend kegeltjes, zeer dicht opeengepakt.

A.5. de lichtstroom of flux

Om tot een absolute schaal, die de "grootte van licht" aangeeft, te komen is de grootte (licht-)flux of lichtstroom Φ ingevoerd, met de meeteenheid lumen. Eén lumen is de "hoeveelheid lichtflux" vervat in een bepaald vermogen in watts bij een bepaalde golflengte (555 nm voor fotopisch zien). De eerder bepaalde verhoudingsschaal maakt het mogelijk ook bij andere golflengten het aantal lumens te berekenen.

A.6. de lichtsterkte

Wegens technische redenen is in het ISO-stelsel niet de lumen, maar de candela grondeenheid. De candela heeft als grootte één lumen per steradiaal. Begripsgrondslag is een hypothetische homogeen (in alle richtingen gelijk) uitstralende puntlichtbron, die in totaal 4π lumen uitstraalt. Hierop heeft dan de grootte lichtsterkte I, eenheid candela, betrekking. De lichtsterkte van deze hypothetische puntlichtbron heeft in alle richtingen de lichtsterkte 1 candela (de omringende ruimte omvat immers 4π steradiaal). Geen enkele lichtbron is echter homogeen; daarom geldt de lichtsterkte praktisch altijd in één bepaalde richting. In die richting geldt dan $I = \frac{d\Phi}{d\omega}$, waarin ω de ruimtehoek rond de gegeven richting is.

A.7. de illuminantie of verlichtingssterkte

Geen enkel uitstralend (reflekerend) object is echter puntvormig. Om dit probleem te verhelpen is eerst de grootte verlichtingssterkte E nodig: flux per oppervlak, $E = \frac{\Phi}{A}$. Bij deze grootte hoort de eenheid lux, met de grootte van één lumen per vierkante meter. Als begripsgrondslag kan het volgende model dienen. Om de eerder genoemde homogene puntlichtbron bevindt zich een bol met een straal van 1 m. De verlichtingssterkte op de binnenzijde van deze bol bedraagt dan overal 1 lux; immers, de 4π lumen van de lichtbron is homogeen verdeeld over $4\pi \text{ m}^2$. Wat ruw gezegd betekent dit dat een lichtbron van 1 candela op 1 m afstand een verlichtingssterkte van 1 lux geeft op een oppervlak dat loodrecht staat op de lichtstraalrichting waarin die waarde van 1 candela

geldig is. In werkelijkheid moet, omdat de lichtsterkte kan variëren met de richting, voor een reëel bestraald oppervlak gedetailleerder geredeneerd worden; voor elk oppervlakelement dA geldt een bepaalde richting met een bepaalde I , en dus een bepaalde $\frac{d\Phi}{dA} = E$.

Bovendien wordt hierin met dA alleen het "effektieve" oppervlak bedoeld, d.w.z. de geprojecteerde grootte ervan loodrecht op de stralingsrichting. Bij een niet-loodrecht oppervlakelement dS , waarop het licht onder een hoek φ invalt, geldt als effectief oppervlak: $dA = dS \cdot \cos \varphi$. De betreffende hoek is de hoek die de "lichtstraal" maakt met de normaal op het oppervlak in het "invalspunt".

A.8. helderheid en luminantie

Voor een (niet al te groot) oppervlak A op (niet al te kleine) afstand s van een lichtpunt geldt voor de ruimtehoek ω uit de lichtbron, waarbinnen stralen het vlak A bereiken, de betrekking $\omega = A:s^2$. Deze betrekking geeft een rechtstreeks verband aan tussen lichtsterkte en verlichtingssterkte:

$$\left. \begin{aligned} I &= \frac{d\Phi}{d\omega} \\ E &= \frac{d\Phi}{dA} \\ \omega &= \frac{A}{s^2} \end{aligned} \right\} \Rightarrow E = \frac{d\Phi}{d\omega \cdot s^2} \iff E = I:s^2$$

(In de laatste betrekking zien we de voor stralingsverschijnselen vertrouwde omgekeerde evenredigheid met het kwadraat van de afstand.)

Stel nu dat een homogeen lichtuitstralend (reflektierend) lichaam met een (in de richting van het oog "geprojecteerd") oppervlak A_L op het oog een verlichtingssterkte E_L teweegbrengt, terwijl het zich op afstand s_L bevindt. Dan is het zinvol deze uitgebreide lichtbron numeriek equivalent te noemen aan een puntlichtbron met lichtsterkte $I_L = E_L \cdot s_L^2$.

Aan het oog vertoont zich dan echter vaak geen lichtpunt, maar een helder vlak. Eenzelfde lichaam (even groot) dat op dezelfde afstand de dubbele verlichtingssterkte op het oog levert, vertoont zich helderder. Een (geprojecteerd!) tweemaal zo groot vlak op dezelfde afstand en met dezelfde fysische stralingseigenschappen geeft ook tweemaal zoveel verlichtingssterkte, maar toont zich nochtans even helder. Uit deze stand van zaken valt voor "helderheid" (als psychofysisch begrip) een fotometrische grootte "luminantie" L als gelijksoortig te definiëren; luminantie laat zich dan berekenen als (equivalente) lichtsterkte per (uitstralend) oppervlak:

$$L_L = \frac{I_L}{A_L} \iff L_L = \frac{E_L \cdot s_L^2}{A_L} \text{ in cd/m}^2.$$

Uiteraard geldt de nadere kwalifikatie: in een gegeven richting.

(In oudere teksten vindt men wel het symbool B i.p.v. L , en "helderheid" i.p.v. luminantie.)

Het is van belang in te zien dat deze luminantiegrootte L als eigenschap van een gegeven lichaam onafhankelijk is van de afstand en het oppervlak. Bij konstante afstand geldt immers

$E_L \propto A_L$ (tweemaal zo groot vlak, tweemaal meer licht), en bij konstant oppervlak geldt uiteraard $E_L \propto \frac{1}{s^2}$. Dit klopt met de visuele ervaring van helderheid, en met een proximale beschrijving van de waarneming van grote vlakken (zie verderop). De luminantie van een oppervlakdeel in een bepaalde richting is dus een "intrinsieke eigenschap" van dat oppervlakdeel.

Voor reële situaties op menselijke schaal is de grootheid luminantie uiterst belangrijk. Uiteraard geldt ook hier dat de luminantie niet per se steeds (over het hele oppervlak) gelijkmatig is. Gedetailleerd geldt dan ook $dL = \frac{dE_L \cdot s_L^2}{dA_L}$.

A.9. luminantiekontrast in het tafereel

Het omgevingstafereel valt fysisch te beschrijven in termen van aan elkaar grenzende (elkaar overlappende) lichamen. De in de richting van een waarnemer zichtbare oppervlakdelen van die lichamen vertonen o.a. onderscheid in luminantie in die richting. Doordat luminantie-onderscheid fotometrisch te beschrijven is, geeft dit een aangrijpingspunt voor de beschrijving van de in het begin genoemde "lichtheidskontrasten". Het blijkt dat zulke beschrijvingen redelijk korreleren met de visuele ervaringen en reacties van verschillende personen in termen van licht, donker en helderheid.

A.10. "geprojekteerde" luminantiekontrasten

Voordat echter de stap naar een discussie van contrast kan worden gezet, moet eerst worden nagegaan of de distale beschrijving van een tafereel in luminanties werkelijk een beschrijving is van de fysische stimulus waaruit ons visuele apparaat de waarneming verwerft. Immers, het netvlies zit achter in ons oog; de feitelijke lichtgevoelige cellen ontvangen dus licht dat al van alles gepasseerd is. Het grootste deel van de lichtreceptoren ligt zelfs achter een laag bloedvaten, zenuwvezels, zenuwcellen etc. (De cellen in de - zeer kleine - fovea vormen een uitzondering.) Het is heel denkbaar dat het mozaiek van luminante vlakjes in de buitenwereld niet optisch perfect "geprojekteerd" wordt.

Nu blijkt inderdaad dat het tafereel in distale termen niet identiek is aan de stimulus in proximale* termen. Er vindt diffractie, verstrooiing en diffusie plaats. Verantwoordelijk hiervoor zijn de vezelige structuur van hoornvlies en lens, de celstructuren in het netvlies en de pupilrand (diffractie). Bovendien bestaat het stelsel van receptoren uit diskrete elementen, die nog weer deel uitmaken van schakelnetwerken die niet overal in het netvlies gelijk georganiseerd zijn.

In eerste benadering is deze complicatie te beschrijven als een spreiding. Die spreiding is technisch te beschrijven als een Modulatie Transfer Function (MTF). De mate van spreiding is afhankelijk van lichtniveau, golflengte, plaats op het netvlies en leeftijd van de waarnemer. Sterk vereenvoudigd gezegd stelt de MTF een limiet aan de afbeeldingsscherpte.

* proximaal: d.w.z. zoals voorhanden in het zintuig, beschreven in de vorm zoals het zintuig erover beschikken kan.

Het zal blijken dat dit grote konsekventies heeft voor de betekenis van contrasten (in distale termen) voor de waarneembaarheid.

B. KONTRAST BIJ GROTE VLAKKEN

B.1. het psychofysisch contrast

Grote vlakken, d.w.z. vlakken die vanuit het oog grote hoeken (groter dan 30 milliradianen, mrad) omspannen, worden inderdaad op het netvlies altijd afgebeeld als overeenkomstige vlakjes. De grootteverhoudingen van de geprojecteerde vlakjes (hun proximale verhoudingen) komen dan overeen met die van de in de buitenwereld geldende zichthoeken (de distale verhoudingen). De onderlinge waarneembaarheidsverhoudingen blijken voor een groot deel bepaald te worden door een maat gebaseerd op een bepaalde verrekening van het luminantie-ondercheid. De bedoelde verrekening wordt het psychofysisch (helderheids-) contrast C genoemd. Hierbij is L_0 de luminantie van het betreffende object (vlakje) en L_B de luminantie van de omgevende "achtergrond":

$$C = \frac{L_0 - L_B}{L_B} \iff C = \frac{\Delta L}{L_B} *$$

(Het gaat dus om een soort signaal/ruis verhouding!)

B.2. rekenen met contrasten

De "formule" voor psychofysisch contrast lijkt erg eenvoudig, maar leidt soms tot lastige berekeningen. Hierbij speelt mee dat visuele prestaties afhankelijk blijken te zijn van erg veel variabelen, zodat veel afleidingen gebeuren in de vorm van evenredigheden (waarbij dus alle niet genoemde variabelen als konstant gehouden beschouwd worden). Als (beperkte) illustratie volgen hier wat eigenaardigheden.

Vaak zal men contrast willen verhogen door de luminantie van het betrokken object te verhogen. Hoeveel meer luminantie is dan nodig voor een a maal groter contrast? Het intuïtieve antwoord "a maal meer luminantie" is geheel fout:

$$\begin{aligned} \frac{L_0 - L_B}{L_B} = C_1 \wedge \frac{L_X - L_B}{L_B} = C_2 \wedge C_2 = a \cdot C_1 &\implies \\ \implies \frac{L_X - L_B}{L_B} = a \cdot \frac{L_0 - L_B}{L_B} \iff L_X - L_B = a \cdot (L_0 - L_B) &\iff \\ \iff L_X - L_B = a \cdot L_0 - a \cdot L_B \iff L_X = a \cdot L_0 - a \cdot L_B + L_B &\iff \\ \iff L_X = a \cdot L_0 - (a - 1) \cdot L_B & \end{aligned}$$

Vaak worden de luminanties van "object" en "achtergrond" beide bepaald doordat ze altijd door één en dezelfde lichtoorzaak worden opgeroepen, zoals de "partijen" van een schilderij. In

* het contrast als $\frac{L_0 - L_B}{L_B}$ of $\frac{\Delta L}{L_B}$ is de zogenaamde Weber-fractie of Weber-verhouding; ook bij alle andere zintuigen geldt een gelijksoortige regel voor onderscheid/waarneembaarheid. De Weberfractie is niet altijd even bruikbaar, vooral niet bij sterk gestructureerde achtergronden, omdat er dan niet éénzelfde L_B geldt rondom het betrokken vlak.

dat geval zijn L_0 en L_8 evenredig, en dus is het contrast konstant. In feite is het contrast hier beter te beschrijven als een verschilverhouding van reflektierend vermogen:

$$C = \frac{R_0 - R_8}{R_8}$$

Voorwaarde is dan dat de "lichtbron" wel mag variëren in sterkte, maar niet in samenstellingsverhouding t.a.v. de samenstellende golflengten. Regeling van de stroom door een gloeilamp kan wel degelijk leiden tot verschillende contrasten (lagere stroom, roder licht).

Veel onderzoek naar de betekenis van contrast voor de waarneembaarheid gebeurt bij konstant gehouden afstand. In de evenredigheidsformules die de onderzoeksresultaten samenvatten, wordt de afstand in zulke gevallen dan ook stilzwijgend weggelaten. Dit kan verraderlijk zijn, omdat de afmetingen van het waar te nemen objekt toch doorgaans in termen van hun zichthoek-afmetingen worden gegeven. Bij konstante objektmaten verandert de zichthoek omgekeerd evenredig met de afstand. In de genoemde experimenten wordt echter meestal niet de afstand, maar de grootte van het objekt zelf (op konstante afstand) gevarieerd. Men moet hierop bedacht zijn!

B.3. proximaal contrast en drempel

De gegeven omschrijving van contrast is nog geheel in distale termen. In verband met de in A.10. genoemde MTF is het noodzakelijk alles te beschrijven in of te herleiden tot proximale termen; daarbij moet worden aangegeven hoe de distale verschijnselen de proximale kwantitatief bepalen.

In alle nu volgende afleidingen wordt zo veel mogelijk een coherent systeem gehanteerd. De betreffende symbolen en begrippen zijn in een Aanhangsel samengevat. Het is noodzakelijk telkens dit Aanhangsel te raadplegen!

Voor een groot objektvlak geldt:

$$\left. \begin{array}{l} E_R = k_4 \cdot \frac{\Phi_R}{A_R} \\ A_R = k_3 \cdot A_0 \cdot s_0^2 \end{array} \right\} \implies E_R = \frac{k_4}{k_3} \cdot \frac{\Phi_R \cdot s_0^2}{A_0} \quad (1)$$

$$\left. \begin{array}{l} \Phi_R = k_1 \cdot \Phi_P \\ E_0 = \frac{\Phi_P}{A_P} \\ A_P = k_2 \end{array} \right\} \implies E_0 = \frac{\Phi_P}{k_2} \iff \Phi_P = E_0 \cdot k_2 \implies \Phi_R = k_1 \cdot k_2 \cdot E_0 \quad (2)$$

$$(1) \wedge (2) \implies E_R = \frac{k_1 \cdot k_2 \cdot k_4}{k_3} \cdot \frac{E_0 \cdot s_0^2}{A_0} \quad (3)$$

$$\left. \begin{array}{l} L_0 = \frac{E_0 \cdot s_0^2}{A_0} \\ (3) \dots \dots \end{array} \right\} \implies E_R = \frac{k_1 \cdot k_2 \cdot k_4}{k_3} \cdot L_0 \quad (4)$$

Elk tafereeldeel veroorzaakt dus een verlichtingssterkte op het netvlies, evenredig met de (distale) luminantie van dat tafereeldeel. De proximale contrasten in termen van verlichtingssterkten op het netvlies komen overeen met de distale contrasten in termen van luminanties. Zo lang vlakken "groot" genoeg gezien worden, speelt afstand daarbij geen rol. Een vlak werpt wel minder licht in het oog ($\propto \frac{1}{s^2}$), maar het projectiebeeld krimpt in gelijke mate ($\propto \frac{1}{s^2}$).

Bij grote vlakken is het contrast dus goed te beschrijven in distale termen. Immers, bovenstaande afleiding geldt ook voor elk(e) achtergrond(deel), waaruit volgt:

$$E_{BR} = \frac{k_1 \cdot k_2 \cdot k_4}{k_3} \cdot L_B \quad \dots \quad (5)$$

De afleiding tot (4) is ook uit te voeren met het voor contrast noodzakelijke verschil-uitgangspunt. In de hier gehanteerde symbolen luidt dit:

$$\left. \begin{array}{l} \Delta E_R = k_4 \cdot \frac{\Delta \Phi_R}{A_R} \\ A_R = k_3 \cdot A_0 \cdot s_0^2 \end{array} \right\} \implies \Delta E_R = \frac{k_4}{k_3} \cdot \frac{\Delta \Phi_R \cdot s_0^2}{A_0} \quad \dots \quad (6)$$

$$\left. \begin{array}{l} \Delta \Phi_R = k_1 \cdot \Delta \Phi_P \dots \dots \dots \\ \Delta E_0 = \frac{\Delta \Phi_P}{A_P} \\ A_P = k_2 \dots \dots \end{array} \right\} \implies \left. \begin{array}{l} \Delta \Phi_P = \Delta E_0 \cdot k_2 \\ \Delta \Phi_R = k_1 \cdot k_2 \cdot \Delta E_0 \dots (7) \end{array} \right\}$$

$$(6) \wedge (7) \implies \Delta E_R = \frac{k_1 \cdot k_2 \cdot k_4}{k_3} \cdot \frac{\Delta E_0 \cdot s_0^2}{A_0} \quad \dots \quad (8)$$

$$\left. \begin{array}{l} \Delta L_0 = \frac{\Delta E_0 \cdot s_0^2}{A_0} \\ (8) \dots \dots \dots \end{array} \right\} \implies \Delta E_R = \frac{k_1 \cdot k_2 \cdot k_4}{k_3} \cdot \Delta L_0 \quad \dots \quad (9)$$

Door combinatie van (5) en (9) krijgen we dan voor grote vlakken:

$$\frac{\Delta E_R}{E_{BR}} = \frac{\Delta L_0}{L_B} \quad \dots \quad (10)$$

Dit moet ook gelden als een experimenteel bepaald distaal drempelcontrast C_{dr} of ϵ (meestal gedefinieerd m.b.t. een bepaalde waarnemingskans, zoals 50% of 75%) wordt bedoeld. Blijkbaar wordt voor die waarnemingskans dus feitelijk een minimaal proximaal contrast vereist:

$$\left(\frac{E_R - E_{BR}}{E_{BR}} \right)_{dr} = \epsilon_{prox} \quad \dots \quad (11)$$

B.4. versmearing van proximaal contrast

Voor we verder gaan is het goed eens na te gaan wat de eerder genoemde MTF in dit geval betekent. Het distale luminantieonderscheid is diagrammatisch aldus weer te geven:

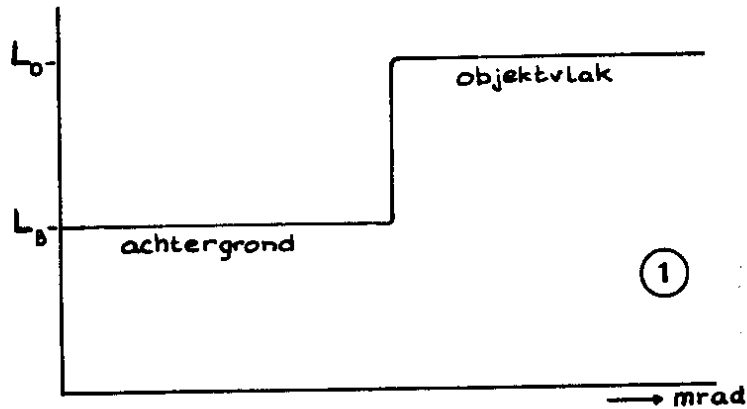


Fig. 1 verloop distaal luminantiecontrast

Het overeenkomstige verlichtingsprofiel (illuminantieprofiel) op het netvlies ziet er dan a.h.w. zo uit:

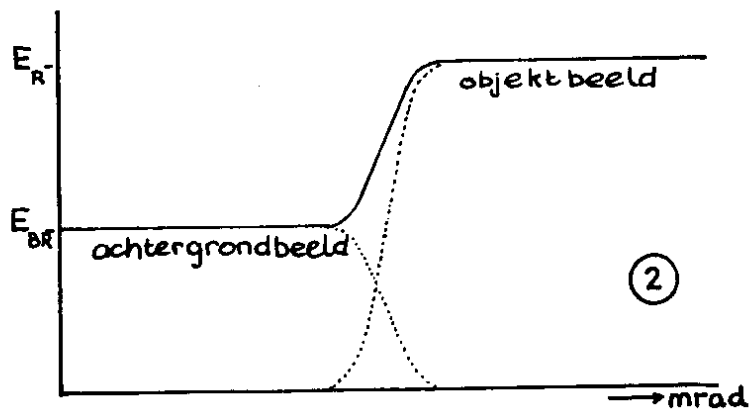


Fig. 2 verloop proximaal illuminantiecontrast

Er treedt dus een vrij sterke grensversmering op. Dit blijkt duidelijker als de achtergrond totaal duister is:

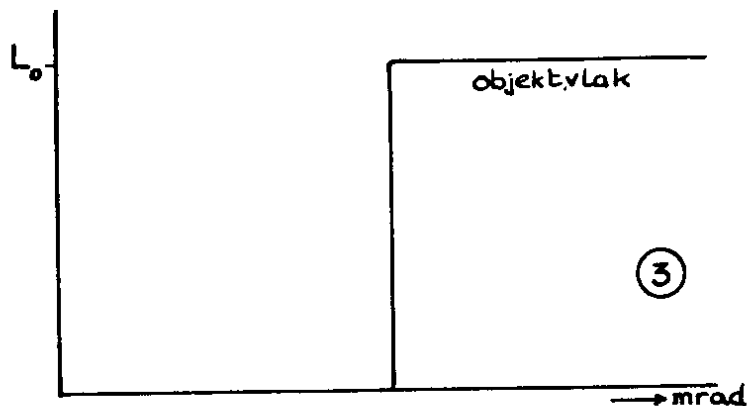


Fig. 3 verloop distaal lum. contrast bij duistere achtergrond

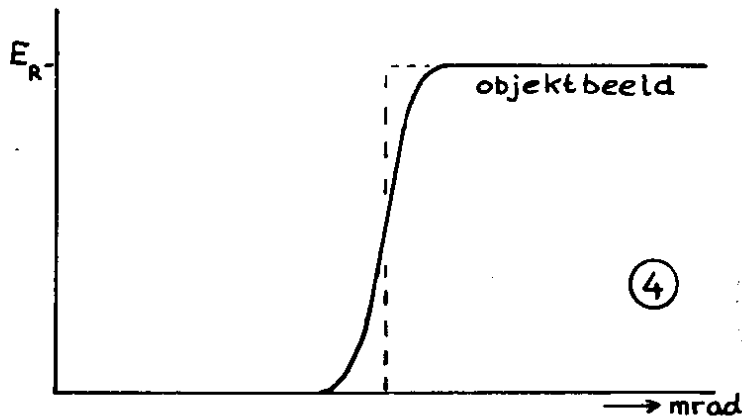


Fig. 4 verloop proximaal ill. contrast bij duistere achtergrond

De "breedte" van de versmearing komt systematisch overeen met een bepaald aantal receptoren. De steilte van de overgang is echter afhankelijk van het contrastprofiel, overeenkomend met $\frac{E_R - E_{BR}}{E_{BR}}$, dat bij grote vlakken weer volledig overeenkomt met het luminantiecontrast.

(Overigens is een totaal donkere achtergrond onbestaanbaar; door verstrooiing werpt elke lichtbron zelf een sluier op het netvlies. Bovendien bestaat er in het zenuwstelsel altijd een basisruis.)

B.5. proximaal contrast en flanksteilte

Een beeld op het netvlies staat nooit stil (drift, regeltremor en saccadische bewegingen). De steile overgangsflank valt daardoor telkens op nieuwe (verse) receptoren. Met een konstant signaal gestimuleerde zintuigcellen (of netwerken daarvan) produceren zelf al na zeer korte tijd geen signaal meer. De flank van een E-profiel op telkens andere cellen (celgroepen) kan echter een duidelijk signaal teweegbrengen. Het is zeer waarschijnlijk dat een dienovereenkomstig verschilsignaal (in termen van afgeleiden) de eerste aanleiding tot visueel waarnemen oplevert.

Het gedrag van "drempelcontrast" e.d. bij grote vlakken is aanleiding tot de veronderstelling, dat het proximale contrast in termen van verlichtingssterkten binnen een bepaalde range van E_{BR} -waarden evenredig is met een bepaalde maat voor de "flanksteilheid" van het verlichtingssterkteprofiel.

Bij grote vlakken komt een minimale flanksteilheid dan rechtstreeks overeen met een minimaal distaal luminantiecontrast, dat onafhankelijk is van afstand en precieze afmeting. Men kan dus zeggen dat binnen een bepaalde range van E_{BR} -waarden (en voor bepaalde konstante situatievariabelen) geldt, dat het drempelcontrast ϵ konstant is:

$$\epsilon = k \quad (\text{grote vlakken})$$

C. KONTRAST BIJ KLEINE VLEKJES

C.1. de versmeringslimiet

Een geheel andere situatie doet zich voor bij kleine vlakken, d.w.z. vlakken waarbij de omspannen zichthoek beduidend kleiner is dan 6 mrad. De MTF zorgt dan voor een ingrijpende versmering:

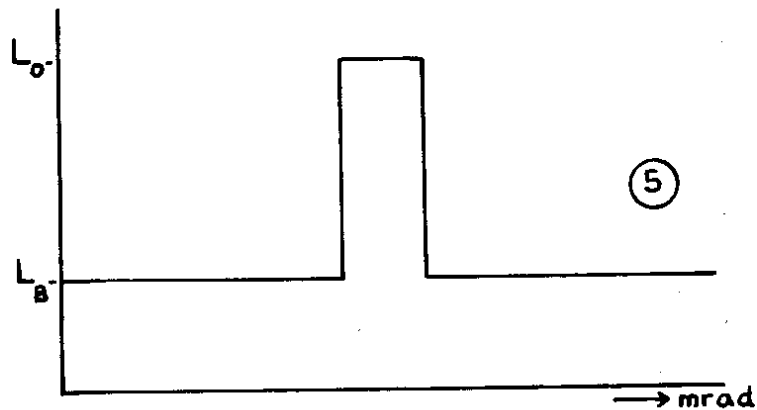


Fig. 5 verloop distaal lum. contrast kleine vlek

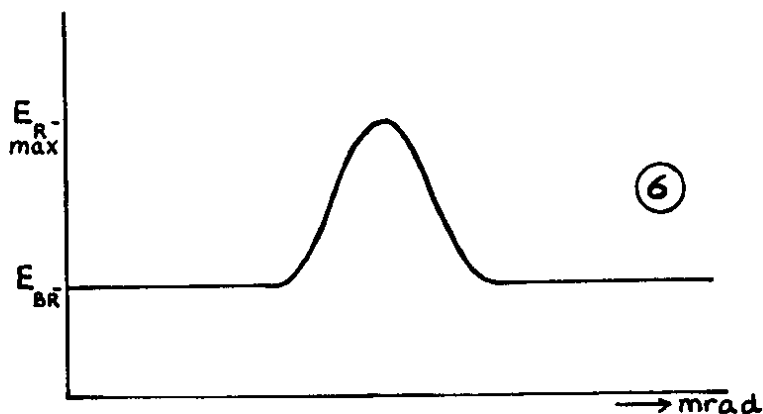


Fig. 6 verloop proximaal ill. contrast kleine vlek

Essentieel hierbij is dat de omvang van de versmering door de MTF (in operationeel opzicht t.a.v. de receptoren) zo goed als vastligt. Een smaller maar even hoog luminantieprofiel in het eerste diagram produceert vooral een lager verlichtingsprofiel op het netvlies, waarvan de flank uiteraard aanzienlijk minder steil is. Het proximale resultaat is dan niet te onderscheiden van wat het gevolg is van een lager maar even breed luminantieprofiel in het distale diagram.

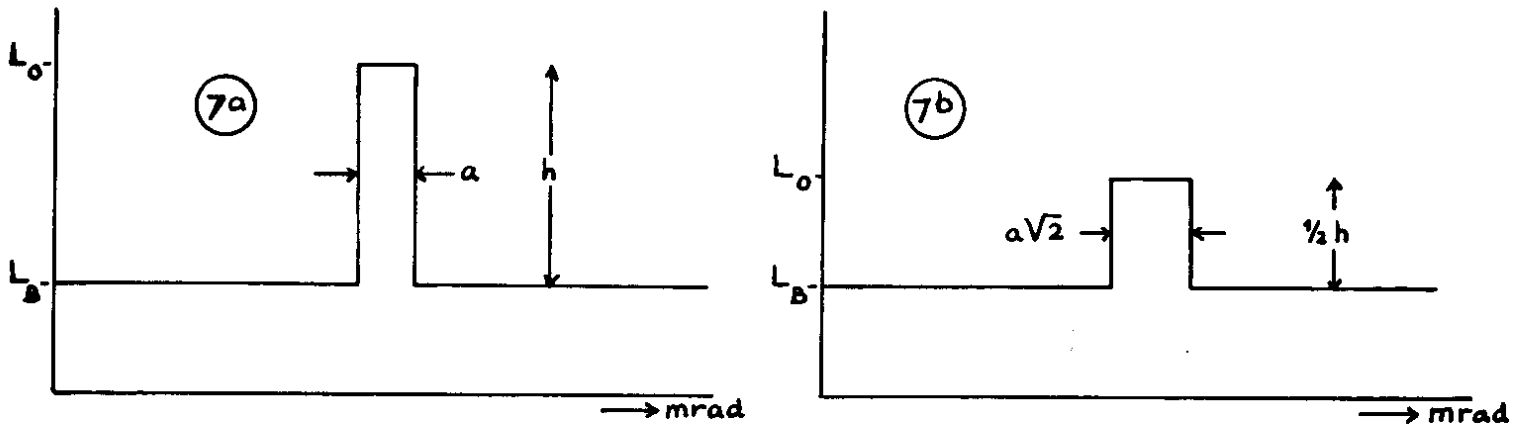


Fig. 7 distaal lum. contrast van twee "lichtpunten"

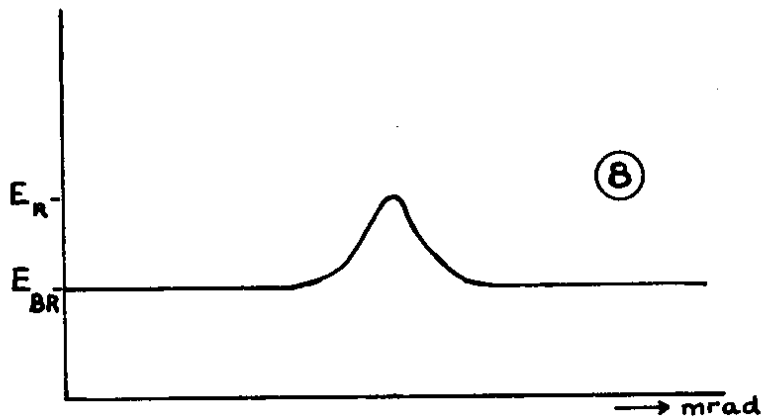


Fig. 8 proximaal resultaat van beide lichtpunten

Bij dergelijke kleine vlekjes speelt dan ook niet de helderheid (distaal), maar de opgeroepen verlichtingssterkte (proximaal) de hoofdrol. "Puntlichtbronnen" worden alle a.h.w. "even groot" afgebeeld. Vereist is nog steeds een minimale flanksteilte, of verschil in verlichtingssterkte op het netvlies t.o.v. de achtergrond.

C.2. contrastdrempel voor "lichtpunten"

Wanneer de gehele objektvorm ideaal afgebeeld binnen een zekere afmetingsgrens zou vallen, dan wordt alle licht afkomstig van het objekt a.h.w. over een door de MTF bepaald minimum beeldvlak β uitgesmeerd. Binnen een range van E_{BR} -waarden geldt a.h.w. een konstante β .

Dit betekent dat het beeldoppervlak A_R niet langer evenredig is met $A_0 : s_0^2$, maar de konstante waarde β heeft. In wezen is dit de betekenis van het begrip lichtpunt, of het begrip puntlichtbron.

Wij mogen aannemen, en experimenten bevestigen dit, dat de waarneembaarheid ook nu bepaald wordt door het proximale contrast, vgl. (11), oftewel door de flanksteilheid van het E-profiel. Binnen een range van E_{BR} -waarden is de effectieve maat van flanksteilheid bij benadering evenredig met het

proximale contrast $\frac{\Delta E_R}{E_{BR}}$. Een afleiding voor "punten" is dan (in verschiltermen) als volgt:

$$\left. \begin{aligned} \Delta E_R &= k_4 \cdot \frac{\Delta \Phi_R}{A_R} \\ A_R &= \beta \end{aligned} \right\} \implies \Delta E_R = \frac{k_4}{\beta} \cdot \Delta \Phi_R \dots \dots \dots (12)$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta \Phi_R &= k_1 \cdot \Delta \Phi_P \dots \dots \dots \\ \Delta E_0 &= \frac{\Delta \Phi_P}{A_P} \\ A_P &= k_2 \end{aligned} \right\} \implies \Delta \Phi_R = k_1 \cdot k_2 \cdot \Delta E_0 \dots (13)$$

$$\begin{aligned} (12) \wedge (13) &\implies \Delta E_R = \frac{k_1 \cdot k_2 \cdot k_4}{\beta} \cdot \Delta E_0 \\ \Delta L_0 &= \frac{\Delta E_0 \cdot s_0^2}{A_0} \iff \Delta E_0 = \frac{\Delta L_0 \cdot A_0}{s_0^2} \dots \dots \dots \implies \\ &\implies \Delta E_R = \frac{k_1 \cdot k_2 \cdot k_4}{\beta} \cdot \frac{\Delta L_0 \cdot A_0}{s_0^2} \dots \dots \dots (14) \end{aligned}$$

Voor de achtergrond(delen) blijft (5) geldig:

$$E_{BR} = \frac{k_1 \cdot k_2 \cdot k_4}{k_3} \cdot L_B \dots \dots \dots (5)$$

Kombinatie van (14) met (5) levert:

$$\frac{\Delta E_R}{E_{BR}} = \frac{k_3}{\beta} \cdot \frac{\Delta L_0}{L_B} \cdot \frac{A_0}{s_0^2} \dots \dots \dots (15)$$

De faktor k_3 : β is optisch bepaald, en er geldt dus:

$$\frac{\Delta E_R}{E_{BR}} \propto \frac{\Delta L_0}{L_B} \cdot \frac{A_0}{s_0^2} \dots \dots \dots (16)$$

Het proximale contrast loopt dus bij lichtpunten niet gelijk met het distale luminantiecontrast! Behalve luminantiecontrast zijn nu ook oppervlak (distaal) en afstand (in het kwadraat) essentieel. Experimenten bevestigen dit: verkleining van het oppervlak met a maal moet gecompenseerd worden door de afstand met \sqrt{a} maal te verkleinen; vergroting van de afstand met b maal vereist b^2 maal meer oppervlak.

Binnen een bepaalde range van E_{BR} -waarden is weer een minimale flanksteilte vereist, dus een bepaalde $\frac{\Delta E_R}{E_{BR}}$, dus een bepaalde:

$$\left(\frac{\Delta L_0}{L_B} \right)_{dr} \cdot \frac{A_0}{s_0^2} = \epsilon \cdot \frac{A_0}{s_0^2}$$

Van het (distaal) drempelcontrast voor lichtpunten is daardoor de volgende formulering mogelijk:

$$\epsilon \cdot A_0 : s_0^2 = k \quad (\text{lichtpunten})$$

In technische zin is het praktisch lichtpuntdrempels te definiëren in termen van hun verlichtingssterkte op het oog. In de laatste afleiding volgde uit (12) en (13) immers

$$\Delta E_R \propto \Delta E_0 \dots \dots \dots (17)$$

Verder geldt uiteraard dat

$$E_{BR} \propto E_{B0} \quad (18)$$

Hieruit volgt dat het proximale contrast is uit te drukken in een distaal verlichtingssterkte contrast:

$$(17) \wedge (18) \implies \frac{\Delta E_R}{E_{BR}} = \frac{\Delta E_0}{E_{B0}} \quad (19)$$

Als drempelcontrast kan dan gelden:

$$\epsilon = \left(\frac{E_0 - E_{B0}}{E_{B0}} \right)_{dr} \quad (20)$$

Dit houdt in dat bij een gegeven achtergrond voor een lichtpunt een bepaalde verlichtingssterkte $(E_0)_{dr}$ op het oog, en dus op een gegeven afstand s_0 een bepaalde (equivalente) lichtsterkte $(I_0)_{dr}$ vereist is, waarvoor geldt:

$$E_0 = \frac{I_0}{s_0^2} \implies (E_0)_{dr} = \frac{(I_0)_{dr}}{s_0^2} \quad (21)$$

Deze benadering is met name belangrijk voor signaallichtpunten, zoals het fietsachterlicht (en het fietskoplicht als signaal).

In donkere achtergronden is E_0 altijd véél groter dan E_{B0} . Bij benadering geldt dan voor het contrast en het drempelcontrast:

$$E_0 \gg E_{B0} \implies \begin{cases} C = \frac{E_0}{E_{B0}} \\ \epsilon \propto (E_0)_{dr} \\ \epsilon \propto \frac{(I_0)_{dr}}{s_0^2} \end{cases}$$

C.3. de "wet van Ricco"

Het oppervlak van een "puntlichtbron" of luminant "vlekje" wordt veelal opgegeven in termen van de distaal omspannen zichthoek α ; daarbij is het oppervlak evenredig met het kwadraat van die hoek. De betrekking voor de waarnemingsdrempel van lichtpunten wordt daarom wel geschreven als:

$$\epsilon \alpha^2 = k$$

Onder andere in deze gedaante wordt de betrekking dan "wet van Ricco" genoemd.

Bij laboratoriumproeven wordt de afstand meestal konstant gehouden; slechts de vlekdiаметer en de luminanties worden dan gevarieerd. In veel literatuur wordt α daarom telkens alleen genoemd als "afmeting" van het objekt; expliciet wordt niet meegeformuleerd dat de afstand konstant gehouden is. Dit kan misleidend zijn.

Men moet zich dus expliciet realiseren dat α samenhangt met de afstand. Bij een vierkant objekt kunnen wij de zijde l_0 noemen. Dan geldt:

$$\left. \begin{array}{l} \frac{l_0}{s_0} = \alpha \\ A_0 = l_0^2 \end{array} \right\} \implies \epsilon \alpha^2 \equiv \epsilon \cdot A_0 : s_0^2$$

zodat de "wet van Ricco" inderdaad identiek is met de eerder gegeven betrekking.

C.4. lichtpunten en het tafereel

In de literatuur komt deze "wet" veelvuldig voor, ook in verband met onderzoek naar afwijkingen ervan. De nadruk op deze "wet" heeft geen inhoudelijke reden, maar is historisch bepaald.

Allereerst is er de verlichtingskundige (technische) traditie om vooral te werken met "puntlichtbronnen". Daarnaast is veel fundamenteel onderzoek gedaan naar "absolute" waarnemingsdrempels, waarbij alleen "puntvormige" vlekjes consistente resultaten gaven; bij grotere vormen heeft de vorminhoud duidelijk een moeilijk definieerbare invloed op de waarneembaarheid.

Toch groeide de gewoonte het puntcontrast als fundamenteel te zien. Inhoudelijk ligt dat niet voor de hand. Immers, reële tafereelen bestaan goeddeels uit vlakdelen die in termen van zichthoek beduidend groter zijn dan 6 mrad.

D. TUSSENBESCHOUWING

D.1. de "wet van Piper" en een algemene "wet"

Verband tussen de wet van Ricco en de betrekking voor grote vlakken is noodzakelijk. Immers, een groot vlak ($\epsilon = k$) zal bij toenemende afstand ten slotte een puntvormig vlekje ($\epsilon \alpha^2 = k$) worden. Visueel verloopt deze overgang geleidelijk.

Grafisch weergegeven onderzoeksresultaten m.b.t. waarnemingsdrempels laten inderdaad een geleidelijke overgang zien tussen de twee functies. Halverwege die overgang, dus voor middelmatige vlekken, geldt bij benadering de betrekking:

$$\epsilon \alpha = k$$

Deze betrekking wordt "wet van Piper" genoemd. Ons inziens is deze betrekking echter een willekeurige "fase" in de overgang tussen $\epsilon = k$ en $\epsilon \alpha^2 = k$. Immers, men kan een algemene betrekking formuleren:

$$\epsilon \alpha^r = k \quad \wedge \quad r \in [0, 2]$$

die zowel de "wet" van Ricco als die van Piper omvat, benevens de regel voor grote vlakken. Uit alle onderzoekgegevens blijkt dat de exponent r dan een functie is van de vorm, (hoek-) afmetingen, kleur e.d. van het objekt, terwijl ook andere zaken een rol spelen. Daarnaast is ϵ nog eens een functie van waarnemingstijd, adaptatieniveau, beweging enz. Dit houdt in dat de schrijfwijze met k (=konstant) nogal optimistisch is. Voorondersteld worden telkens allerlei situatiebepalende waarden, waarin vervolgens alleen het van het objekt afkomstige licht, zijn afmeting, en/of de achtergrondhelderheid worden gevarieerd. Niettemin blijkt inderdaad een eenmaal gevonden drempelcontrast voor verschillende proefpersonen redelijk konstant samen te hangen volgens de hier gegeven "wetten", mits men de overige situatievariabelen konstant houdt. Een belangrijke beperking is echter dat men het "globale lichtniveau" (en de daardoor bepaalde adaptatie-toestand van

het visueel apparaat van de waarnemer) binnen een bepaalde range van ordes van grootte moet houden.

D.2. gevoeligheid en lichtniveau

Voorals valt nl. een verschil op tussen drempelcontrasten bij normale én hoge, en bij zeer lage lichtniveaus. Bij zeer lage lichtniveaus gelden nl. beduidend hogere drempelcontrasten. Dit heeft geleid tot de gedachte dat "het oog" bij zeer laag lichtniveau beduidend minder gevoelig is; specifiek werd aan het "staafjesapparaat" een lagere gevoeligheid toegeschreven. Wanneer men echter rekening houdt met het diskrete karakter van elektromagnetische straling, als bestaande uit quanta, dan blijkt deze visie achterhaald. Rekening houden met het quantumkarakter is volstrekt niet overdreven, want het menselijk netvlies blijkt te beschikken over een quantumefficiëncy van vrijwel zeker nagenoeg 100% (d.w.z. t.a.v. quanta die daadwerkelijk de receptoren bereiken). Overigens is al lang geleden geconstateerd dat in zeer donkere omgevingen het ervaren tafereel een korrelig karakter krijgt!

Het visueel apparaat integreert over een bepaalde tijd τ . Wanneer de quantumflux gering is, dan is de nauwkeurigheid in het aangeven van verschillen en verhoudingen met die flux uiteraard ook heel gering. Subtiële contrasten vereisen een hoge "nauwkeurigheid", en dus grotere aantallen quanta. Dit inzicht is gemakkelijk wanneer men zich de quanta voorstelt als binaire digits. Hoe lager het globale lichtniveau, hoe grover de contrasten moeten zijn wil de quantumflux een weergave mogelijk maken! Twee groepen van elk 100 quanta kunnen ten minste met één quantum verschillen; dit maakt verhoudingen van 1:100, 51:52, 1:59 etc. weergeefbaar. Ook twee groepen van elk twee quanta kunnen met ten minste één quantum verschillen; nu zijn slechts de verhoudingen 0:2, 1:2, 1:1, 2:1 en 2:0 weergeefbaar.

Voegt men hierbij de onzekerheid inherent aan quantumabsorptie, dan wordt duidelijk dat bij laag lichtniveau (= lage quantumflux) slechts grove contrasten waarneembaar zijn.

D.3. contrast in andere termen

In het voorafgaande is nogal gesjoemeld met evenredigheden. Dit is in de betreffende literatuur een gebruikelijke gang van zaken. Het een en ander is dan vaak nog extra ontoegankelijk doordat elke onderzoeker zich uitdrukt in grootheden die hem het best uitkomen of het meest vertrouwd zijn. Soms is dit niet ernstig, zoals bij grote vlakken waar geldt:

$$C = \frac{L_0 - L_B}{L_B} = \frac{E_0 - E_B}{E_B}$$

wanneer met de E-waarden de waarden op het netvlies worden bedoeld.

Moeilijker wordt het, wanneer het contrast wordt gedefinieerd als $\frac{\Delta I}{I_B} = \frac{I_0 - I_B}{I_B}$. Dit is echter toelaatbaar, als

in een donker laboratorium een achtergrondvlek wordt gebruikt met daarin een kleiner doelobject, beide op een vaste afstand. De I-waarden zijn dan vervangende (equivalente) lichtsterkten; bovendien wordt dan met I_B de equivalente lichtsterkte bedoeld

van het doelobject, wanneer dit dezelfde luminantie als de achtergrond zou hebben. Daardoor geldt inderdaad:

$$\frac{I_0 - I_B}{I_B} = \frac{(L_0 \cdot A_0) - (L_B \cdot A_0)}{L_B \cdot A_0} \iff \frac{A_0 \cdot (L_0 - L_B)}{A_0 \cdot L_B} = \frac{L_0 - L_B}{L_B}$$

D.4. de quantumbenadering

Een totaal andere benadering volgt uit de "quantumtheorie van visuele drempels". Hierin wordt uitgegaan van de uit diverse berekeningen en experimenten volgende hypothese dat de absorptie van twee lichtquanta binnen een tijd τ , en door receptoren die niet verder dan een afstand λ uiteenliggen, voldoende is voor een waarnemingsindruk in totale duisternis. Uit die theorie volgen statistische modellen die met aantallen quanta werken.

Daarbij wordt het symbool N gebruikt, een dimensieloze grootte die het aantal quanta aangeeft. Zo is (bij duistere achtergrond) $\bar{N}_{60\%}$ het gemiddeld aantal quanta op het oog, nodig om een bepaalde vorm in een bepaalde tijd waargenomen te doen worden in 60% van de gevallen. Nu is N weliswaar dimensieloos in formele zin, maar door de impliciete kwalifikatie (aantal) quanta is het toch mogelijk verband te leggen met het fotometrische paradigma. Dit gaat te gemakkelijker, omdat bij zulk onderzoek doorgaans monochromatisch licht wordt gebruikt, d.w.z. licht als eigenschap van elektromagnetische straling met één bepaalde golflengte.

E. THEORIE VAN KONTRAST BIJ LIJNEN

E.1. inleiding

Het bovenstaande is wijdlopij, maar noodzakelijk voor een begrip van het weinige dat in de literatuur gegeven is t.a.v. contrasten bij lijnvormige objecten. Er zijn namelijk slechts twee bronnen voorhanden, die elk een van de genoemde afwijkende benaderingen volgen. Alvorens deze bronnen op te voeren beginnen we met een eigen (eerste) benadering van lijnvormige objecten met een positief contrast.

E.2. proximale flanksteilte bij lijnen

Onder lijnvormige objecten worden zelfstandig kontrasterende delen (dus geen grenzen tussen twee vlakken) van het tafereel verstaan, die in één richting voldoen aan de beschrijving "klein" en in de andere aan de beschrijving "groot", zoals die hiervoor is gehanteerd. Zoals aangegeven wil klein zeggen, dat de omspannen beeldhoek minder is dan 6 mrad. Onder groot wordt nu niet alleen "groter dan 30 mrad" verstaan, maar ook waarden tussen 6 en 30 mrad worden bedoeld, hoewel de zaak daar minder zeker is. Bovendien slaat kleiner dan 6 mrad vooral op waarden die inderdaad veel kleiner zijn.

Ter illustratie: de bies in een retroreflekterende band omspant qua breedte al op 10 m nog maar 0,5 mrad. Op 100 meter is de cirkeldiameter slechts 6 mrad, maar de omtrek bedraagt dan nog 19 mrad. Op 200 meter wordt die omtrek 9,5 mrad.

Vanwege de eerder besproken MTF zullen zulke objecten proximaal gesproken alle "even breed" op het netvlies komen.

Het betreffende illuminantie-profiel zal als het ware een "ribbel" vormen, waarvan de breedte vastligt, en waarvan vooral de flanksteilheid belangrijk zal zijn voor de waarneembaarheid. Deze flanksteilheid zal variëren met de verlichtingssterkte, op een manier zoals die ook bij puntlichtbronnen geldt: veranderingen in distale breedte kunnen equivalent zijn met veranderingen in (distale) helderheid. Voor distale breedte kan natuurlijk de omspannen zichthoek op die breedte gesubstitueerd worden.

E.3. lineair contrast, lijnbreedte en afstand

Wanneer de objektvorm ideaal afgebeeld in één richting binnen de eerder genoemde afmetingsgrens zou vallen, maar in een andere (dwars-)richting die maat ruim overschrijdt, dan wordt alleen de "lengte" isometrisch afgebeeld terwijl de "breedte" a.h.w. wordt uitgesmeerd over een door de MTF bepaalde maat β' . Men kan zich β' voorstellen als de diameter van een cirkel met oppervlak β . Binnen een bepaalde range van E_{BR} -waarden zal β' nagenoeg konstant zijn. Ook bij lijnvormen is daarom A_R niet langer evenredig met $A_0 : s_0^2$. Lijnen (stroken, strepen) hebben als (distaal) oppervlak het produkt van lengte en breedte:

$$A_0 = l_0 \cdot b_0$$

Noemen wij de lengte van het beeld op het netvlies l , dan geldt:

$$\left. \begin{array}{l} A_R = \beta' \cdot l_R \\ l_R = k_5 \cdot \frac{l_0}{s_0} \end{array} \right\} \implies A_R = k_5 \cdot \beta' \cdot \frac{l_0}{s_0}$$

Ook voor de met lengte l_R en breedte β' afgebeelde lijnvorm (de "ribbel" van verlichtingssterkte op het netvlies) geldt uiteraard dat de "flanksteilte" bepalend zal zijn voor de waarneembaarheid. Opnieuw mag worden aangenomen dat binnen een zekere range van E_{BR} -waarden de effectieve maat voor die flanksteilte evenredig zal zijn met het proximale contrast (in termen van verlichtingssterkte op het netvlies):

$$\frac{\Delta E_R}{E_{BR}}$$

Vanuit het bovenstaande volgt dan voor lijnvormen de volgende afleiding in verschiltermen:

$$\left. \begin{array}{l} \Delta E_R = k_4 \cdot \frac{\Delta \Phi_R}{A_R} \\ A_R = k_5 \cdot \beta' \cdot \frac{l_0}{s_0} \end{array} \right\} \implies \Delta E_R = \frac{k_4}{k_5 \cdot \beta'} \cdot \frac{\Delta \Phi_R \cdot s_0}{l_0} \dots (22)$$

$$\left. \begin{aligned}
 \Delta\Phi_R &= k_1 \cdot \Delta\Phi_P \dots \dots \dots \\
 \Delta E_0 &= \frac{\Delta\Phi_P}{A_P} \\
 A_P &= k_2 \dots
 \end{aligned} \right\} \Rightarrow \Delta\Phi_P = \Delta E_0 \cdot k_2 \left. \Rightarrow \Delta\Phi_R = k_1 \cdot k_2 \cdot \Delta E_0 \quad (23) \right.$$

$$(22) \wedge (23) \Rightarrow \Delta E_R = \frac{k_1 \cdot k_2 \cdot k_4}{k_5 \cdot (\beta')^2} \cdot \frac{\Delta E_0 \cdot s_0}{l_0} \dots \dots \dots$$

$$\left. \begin{aligned}
 \Delta L_0 &= \frac{\Delta E_0 \cdot s_0^2}{A_0} \iff \Delta E_0 = \frac{\Delta L_0 \cdot A_0}{s_0^2} \\
 A_0 &= b_0 \cdot l_0 \dots \dots \dots
 \end{aligned} \right\} \Rightarrow \Delta E_0 = \frac{\Delta L_0 \cdot b_0 \cdot l_0}{s_0^2} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \Delta E_R = \frac{k_1 \cdot k_2 \cdot k_4}{k_5 \cdot (\beta')^2} \cdot \frac{\Delta L_0 \cdot b_0 \cdot l_0 \cdot s_0}{s_0^2 \cdot l_0} \iff$$

$$\iff \Delta E_R = \frac{k_1 \cdot k_2 \cdot k_4}{k_5 \cdot (\beta')^2} \cdot \frac{\Delta L_0 \cdot b_0}{s_0} \dots \dots \dots (24)$$

Als voren geldt weer (5) voor de achtergrond:

$$E_{BR} = \frac{k_1 \cdot k_2 \cdot k_4}{k_5} \cdot L_B \dots \dots \dots (5)$$

Kombinatie van (5) met (24) levert dan:

$$\frac{\Delta E_R}{E_{BR}} = \frac{k_3}{k_5 \cdot \beta'^2} \cdot \frac{\Delta L_0}{L_B} \cdot \frac{b_0}{s_0} \dots \dots \dots (25)$$

Hierin is $k_3: (k_5 \cdot \beta'^2)$ een optisch bepaalde faktor, dus er geldt:

$$\frac{\Delta E_R}{E_{BR}} \propto \frac{\Delta L_0}{L_B} \cdot \frac{b_0}{s_0} \dots \dots \dots (26)$$

Ook bij lijnen loopt het proximale contrast dus niet gelijk met het distale luminantiecontrast. Naast dat luminantiecontrast zijn nu de lijnbreedte (distaal) en de afstand essentieel. Verkleining van de breedte met a maal vereist een verkleining van de afstand met a maal; vergroting van de afstand met b maal wordt gecompenseerd door ook de breedte b maal te vergroten.

Binnen een zekere range van E_{BR} -waarden zal een bepaalde minimale flanksteilte, dus een bepaalde $\Delta E_R : E_{BR}$, dus een bepaalde $\left(\frac{\Delta L_0}{L_B}\right)_{dr} \cdot \frac{b_0}{s_0} = \epsilon \cdot \frac{b_0}{s_0}$ vereist zijn. Het aldus vereiste drempelcontrast leidt tot de formulering:

$$\epsilon \cdot \frac{b_0}{s_0} = k \quad (\text{lijnen})$$

E.4. de lineaire luminantie

Hieruit blijkt dat het waargenomen contrast, of het waargenomen helderheidsverschil evenredig is met het produkt van luminantie en lijnbreedte, en omgekeerd evenredig met de afstand.

Op een gegeven afstand kan een halvering van het helderheidsverschil dus gecompenseerd worden door verdubbeling van de lijnbreedte, en vice versa (binnen de genoemde hoekgrenzen). De visuele eigenschappen van het objekt blijven

dan gelijk. Het is daarom zinvol het begrip lineaire luminantie in te voeren, uitgedrukt in candela's per meter (waarbij de lengte van het object in meters wordt uitgedrukt). Deze grootheid voor lijnvormen staat dus naast die voor grote vlakken (luminantie, in candela's per vierkante meter) en die voor punten (lichtsterkte, in candela's). De luminantie van grote vlakken verandert echter niet in visuele indruk met de afstand. De lichtsterkte van een punt geeft echter een indruk die afneemt met het kwadraat van de afstand. De lineaire luminantie ten slotte geeft een effect dat omgekeerd evenredig is met de afstand.

De lineaire luminantie is als grootheid in te passen in de eerder gegeven afleiding m.b.t. de verlichtingssterkte op het netvlies. Hiertoe voeren we voor lineaire luminantie het symbool Λ in. Een lijnobject kan zo de lineaire luminantie Λ_0 hebben, de lengte l_0 en (voor een gegeven afstand) een equivalente lichtsterkte I_0 . Dan geldt:

$$\begin{aligned} \Lambda_0 &= \frac{I_0}{l_0} \iff \Lambda_0 = \frac{E_0 \cdot s^2}{l_0} \iff \\ &\iff \Lambda_0 = \frac{E_0 \cdot s}{l_0} \cdot s \} \implies \Lambda_0 = L_0 \cdot \frac{b_0}{s} \cdot s \iff \\ \frac{E_0 \cdot s}{l_0} &= L_0 \cdot \frac{b_0}{s} \dots \} \\ &\iff \Lambda_0 = L_0 \cdot b_0 \} \implies E_R \propto \frac{\Lambda_0}{s} \\ E_R &\propto L_0 \cdot \frac{b_0}{s} \dots \} \end{aligned}$$

(Belangrijk hierin is de "definiërende" vergelijking: $\Lambda = L \cdot b$.) Dit vat het inzicht samen dat leidt tot wat in de volgende paragraaf is samengevat voor konstante donkere achtergrond.

E.5. lineaire luminanties en afstand

Een (voldoende lang) lijnobject met een gegeven breedte en een gegeven luminantie (dus met een gegeven lineaire luminantie) veroorzaakt op het netvlies een "kontrastribbel" die omgekeerd evenredig is met de afstand. Om eenzelfde contrast te krijgen vereist een grotere afstand dus òf een even veel grotere breedte, òf een evenveel grotere luminantie; kortweg een even veel grotere lineaire luminantie.

Anders gezegd: een voldoende lange lijnvorm met een bepaalde (distale) luminantie die op afstand s juist het drempelcontrast levert, vereist op een afstand $a \cdot s$ een a maal grotere luminantie (of een a maal grotere breedte) om opnieuw het drempelcontrast te leveren.

De (distale) beeldhoek α waaronder de breedte gezien wordt verandert omgekeerd evenredig aan de afstand. Verandering van de afstand komt dus neer op verandering van de angulaire breedte. Op konstante afstand is de breedte bepalend bij gegeven distale luminantie.

Het gedrag van lineair drempelcontrast komt dus neer op:

$$\left. \begin{array}{l} \epsilon \cdot \frac{b_0}{s_0} = k \\ b_0 = \alpha \cdot s_0 \end{array} \right\} \implies \epsilon \alpha = k$$

Deze regel hebben we eerder gezien als de "wet van Piper".

E.6. waarnemingskans en lijnlengte

Helaas is het een en ander niet zo eenvoudig, nog afgezien van het feit dat hiermee nog niet is aangegeven hoe groot een lineair drempelcontrast in absolute zin (op een gegeven afstand, bij een bepaalde achtergrondluminantie) zal zijn. Van fundamenteeler belang is het volgende.

In het voorafgaande is telkens de beperkende conditie genoemd: bij een voldoende lange lijnvorm. Bedoeld werd een lijnvorm die veel groter is (in zichthoek termen) dan 30 mrad. Het is immers aannemelijk dat ook de lijnlengte (en niet alleen het lineair contrast) de waarnemingskans bepaalt. Alleen bij "oneindig" lange lijnvormen zou men dat mogen verwaarlozen. Reële lijnvormen worden (in zichthoek termen) kleiner met de afstand: het netvliesbeeld heeft een lengte die omgekeerd evenredig is met de afstand. En wielcirkels vallen, zoals eerder weergegeven, duidelijk in het "schemergebied" tussen 30 mrad en ± 6 mrad!

Met name moet beseft worden dat de beeldlengte het aantal receptoren (receptornetwerken) bepaalt dat kan bijdragen aan de waarneming. Met name in drempelsituaties heeft dat grote invloed op de beslissingsprocessen in het visuele apparaat, vooral wanneer het om structuren gaat.

Uit onderzoek in de 40-er en 50-er jaren blijkt inderdaad, dat de lengte van een lineair luminant doel een systematische invloed heeft op de waarnemingskans. Deze invloed werkt afzonderlijk van de eerder genoemde betrekking:

$$\epsilon \cdot b_0 : s_0 = k$$

Wel zien we al meteen in, dat deze onafhankelijke invloeden beide in het geval van wielcirkels zullen samenhangen met de afstand . . .

F. GEGEVENS UIT ONDERZOEK

F.1. contrast en lengte volgens Lamar c.s.

De oudste bron is:

Edward S. Lamar, Selig Hecht, Simon Shlaer & Charles D. Hendley; Size, Shape and Contrast in Detection of Targets by Daylight Vision; I. Data and Analytical Description; Journ. Opt. Soc. Am. 37, 7 (531-545); 1947.

De proeven zijn genomen met "daylight vision", d.i. fotopisch. De achtergrondluminanties waren 2950 en 17.5 ftL (= 10.000 en 60 cd.m⁻²). Het ging om rechthoekige, verticale vormen. De smalste vormen vielen onder onze definitie van lineaire structuren. Gevarieerd werden de objektluminantie, de lengte/breedte verhoudingen en het oppervlak. Gemeten werd

de 50% waarnemingskans tijdens bij herhaling aangeboden targets (er is ook perifeer wat gemeten, maar met de z.g. limit-methode en in relatieve termen).

Drempelcontrast wordt in deze tekst uitgedrukt als $(\Delta I/I)_{dr}$ en er wordt nog een oude (veel te optimistische) benadering van de MTF gebruikt. Alle maten zijn in boogminuten en de helderheden in ftL (voet-Lambert). Gelukkig zijn er veel diagrammen met samengevatte onderzoeksresultaten, zodat de data toegankelijk zijn buiten de gebruikte theorie (en wirwar van exotische symbolen) om. Uit de datadiagrammen valt af te leiden, dat in elk geval de door ons al theoretisch afgeleide samenhang tussen (distale) breedte, (distale) helderheid en effectief contrast van toepassing is voor breedtes met een beeldhoek kleiner dan 2 boogminuten (= 0,6 mrad). Ook de tekst vermeldt dit expliciet.

Wat de lengte betreft valt uit de diagrammen voor de laagste helderheid van achtergrond (60 cd.m^{-2}) de volgende betrekking af te leiden voor structuren met een angulaire breedte van 2 boogminuten of minder, maar met een grotere lengte (5 boogminuten = 1,5 mrad of meer):

$$\left(\frac{\Delta I}{I}\right)_{dr} \approx \frac{1}{l_0^{4/3}}$$

Deze betrekking geldt bij konstante angulaire breedte en bij de minst luminante achtergrond. De afstand is uiteraard konstant, omdat die niet werd gevarieerd.

F.2. de algemene formule van Lamar c.s.

Op theoretische gronden, waarin spreiding een rol speelt en de gedachte dat vooral de contrastflank essentieel is (overeenkomstig onze benadering) worden in het onderhavige artikel alle resultaten voor de laagste achtergrondhelderheid samengevat in de relatie:

$$\left(\frac{\Delta I}{I}\right)_{dr} \approx \frac{R^{4/3}}{A}$$

Hierin is R de omtrek van het target (in angulaire termen) en A het angulair oppervlak binnen een "werkzame" zoom ter breedte van 1.5 boogminuten (0.4 mrad) binnen de omtrek van het target, alles in distale termen. (Immers, alle doelen werden als rechthoeken opgevat, ook wat wij hier als lijnobjekten beschouwen.) Zoals hierboven al afgeleid, kan voor de contrastuitdrukking d.m.v. I inderdaad gewoon het drempelcontrastsymbool ϵ worden ingevuld.

Wanneer van een lijnvorm de angulaire lengte l en de angulaire breedte b bedraagt (in mrad), dan geldt:

$$R = 2 \cdot (b+1) \iff R \approx (b+1)$$

Hierin is zeker bij wielcirkels b verwaarloosbaar klein t.o.v. l, zodat geldt:

$$R \approx l$$

Vanaf ruim 10 meter geldt verder bij wielcirkels, dat b zelf de eerder genoemde "werkzame" zoombreedte bereikt. In feite houdt dit in, dat het feitelijk angulair oppervlak het gehele "werkzame" gebied beschrijft (ook de auteur vermeldt dit):

$$A = b \cdot l$$

Uit dit alles volgt, dat voor wielcirkels e.d. de formule van Lamar c.s. als volgt overgaat in:

$$\left(\frac{\Delta I}{I}\right)_{dr} \propto \frac{R^{2/3}}{A} \iff \epsilon \propto \frac{1^{2/3}}{l \cdot b} \iff \epsilon \propto \frac{1}{l^{1/3} \cdot b}$$

De eerste faktor uit de noemer van deze breuk komt exakt overeen met de al eerder uit de data van Lamar c.s. afgeleide omgekeerde evenredigheid. De tweede faktor geeft aan dat een verandering in luminantie(-kontrast) gekompenseerd kan worden met een verandering in breedte, en vice-versa. Dit is de betrekking die wij eerder theoretisch hadden afgeleid, en die (bij konstante afstand) overeenkomt met de "wet van Piper".

F.3. Lamar c.s. vertaald naar afstand, en als "wet"

Bij dit alles golden konstante afstanden. De opgevoerde groot-heden "lengte" en "breedte" zijn bij een konstant object angulaire groot-heden (zichthoeken) die beide omgekeerd evenredig zijn met de afstand. Daaruit volgt:

$$\left. \begin{array}{l} l = \frac{l_0}{s_0} \implies l \propto \frac{1}{s_0} \quad l \propto s_0^{-1} \\ b = \frac{b_0}{s_0} \implies b \propto \frac{1}{s_0} \quad b \propto s_0^{-1} \\ \epsilon \propto \frac{1}{l^{1/3} \cdot b} \dots \dots \dots \end{array} \right\} \implies \epsilon \propto \frac{1}{s_0^{-1/3} \cdot s_0^{-1}} \iff$$

$$\iff \epsilon \propto \frac{1}{s_0^{-4/3}} \iff \epsilon \propto s_0^{1.33}$$

Voor een gegeven lijnvorm (lengte, breedte) in de wielcirkel-range lijkt dus te gelden dat een afstandsverandering met een faktor a een luminantie aanpassing vergt van $a^{1.33}$, wil men dezelfde waarnemingswaarschijnlijkheid bereiken. Ter illustratie: een dubbele afstand vergt dus kennelijk een $2^{1.33} = 2.52$ maal grotere lineaire luminantie, wil "dezelfde waarneembaarheid" gerealiseerd worden (aannemende $L_0 \gg L_B$).

Ter vergelijking: het materiaal van Lamar geeft voor zeer hoge verlichtingsniveaus $\epsilon \propto s_0^{1.25}$, zodat afstandsverdubbeling 2.38 maal meer lineaire luminantie vraagt. In algemene termen leidt het werk van Lamar tot de (voor de gegeven range van lichtomstandigheden geldende) "wet":

$$\epsilon \alpha^r = k \quad \wedge \quad r \in [1.25, 1.33]$$

of beter:

$$\epsilon \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_2^r = k \quad \wedge \quad r \in [.25, .33]$$

F.4. Lamar c.s. als algemene "wet"

Ten slotte: combinatie van de door ons eerder theoretisch bepaalde betrekking t.a.v. de distale breedte van lijnvormen met de betrekking t.a.v. $l^{1/3}$ uit de diagrammen van Lamar leidt tot hetzelfde resultaat als verrekening van Lamars formule in termen van R en A .

Geheel in distale termen leidt dat tot de volgende betrekking voor lineaire luminanties binnen de gegeven range:

$$\epsilon \cdot b_0 \cdot l_0^{.33} : s_0^{1.33} = k$$

F.5. contrast en lengte volgens Bouman

De tweede ons ter beschikking staande tekst is iets jonger en afkomstig van onderzoek aan het IZF:

M.A. Bouman; Visual Thresholds for Line-Shape Targets; Journ. Opt. Soc. Am.; 43, 3 (209-211); 1953.

Het betreffende verslag is geheel in termen van de quantumbenadering, met gebruikmaking van het symbool N voor quantumaantallen. Ook hier is gewerkt met vaste afstanden en verticale lijnstukken. De achtergrondluminanties waren beduidend lager. Absolute drempels zijn bepaald bij totale duisternis. Drempelcontrasten werden bepaald voor verschillende golflengten en bij achtergrondluminanties van 0,11 mla (millilamberts) en 0,01 mla, d.w.z. bij 0,35 en 0,03 cd.m⁻². Daarbij betrof het resp. "rood" (650 nm) en "groen" (525 nm) licht.

Essentieel verschil (inherent aan de quantumbenadering!) is dat in dit onderzoek de tijdsduur (korte flitsen) als afzonderlijke variabele is onderzocht. Helaas zijn alleen meetwaarden voor de korrelatie met lengtevariatie gegeven voor zeer korte flitsen. In elk geval is ook hier verrekening tot absolute waarden niet mogelijk. Wel is in het verslag expliciet melding gemaakt van de evenredigheid tussen contrastdrempels ($\overline{\Delta N}_{6.0\%}$!) en lengtevariatie. De lijnen omspannen alle een angulaire breedte van 2 boogminuten (=0,6 mrad).

Boumans verslag en de diagrammatische data tonen de betrekking:

$$\overline{\Delta N}_{6.0\%} \propto l^{3/5}$$

voor groen licht (bij rood licht en helderder achtergrond geldt $l^{3/20}$). De lijnlengte ging angulaair tot 256' (=74 mrad).

F.6. interpretatie van contrast-als-quantumverschil

Voor de interpretatie van Boumans gegevens is het verhelderend te zien hoe hij in N-termen de wet van Ricco etc. weergeeft. Hieronder staat telkens links de konventionele formulering, met rechts de formulering van Bouman in termen van N:

	<u>wet van Ricco</u>	
$\epsilon \alpha^2 = k$		$\overline{\Delta N}_{6.0\%} = k$

	<u>wet van Piper</u>	
$\epsilon \alpha = k$		$\overline{\Delta N}_{6.0\%} \propto d$ (=diameter)

De diameter d wordt bij Bouman angulaair opgevat en komt dus overeen met α . Intuïtief blijkt hieruit dat $\overline{\Delta N}_{6.0\%}$ kan worden opgevat als "evenredig" met $\epsilon \alpha^2$. Voor grote vlakken zou men kunnen aanvullen:

	<u>grote vlakken</u>	
$\epsilon = k$		$\overline{\Delta N}_{6.0\%} \propto \alpha^2$

Het intuïtieve inzicht is fysisch te controleren. Immers, een aantal quanta is evenredig met een flux maal een tijdsduur.

$$K_{\lambda} \cdot N \cdot \frac{hc}{\lambda} = \Phi \cdot t \implies N \propto \Phi \cdot t$$

Hierin is λ de golflengte, h de konstante van Planck en c

de lichtsnelheid (die samen de energie van een quantum bepalen), en K_λ de bij λ horende omrekeningsfactor die uit het elektromagnetisch vermogen voor λ de overeenkomende waarde in lumen geeft.

De betreffende flux (gegeven de afstand) is evenredig met de luminantie maal het oppervlak van het objekt. In termen van een verschil geldt dus (met I als equivalente lichtsterkte):

$$\left. \begin{array}{l} \Delta N \propto \Delta[\Phi_0 \cdot t] \\ t = k_6 \dots \dots \dots \end{array} \right\} \Rightarrow \Delta N \propto \Delta\Phi_0 \left. \begin{array}{l} \Delta\Phi_0 \propto \frac{\Delta I_0}{s_0^2} \\ s_0 = k_7 \dots \dots \end{array} \right\} \Rightarrow \Delta\Phi_0 \propto \Delta I_0 \dots \dots \left. \begin{array}{l} \Rightarrow \Delta N \propto \Delta I_0 \dots \dots \\ \Delta I_0 \propto (L_0 \cdot A_0) - (L_B \cdot A_0) \end{array} \right\} \Rightarrow \Delta N \propto (L_0 - L_B) \cdot A_0$$

Bij gegeven achtergrond geldt dan

$$\left. \begin{array}{l} \Delta N \propto (L_0 - L_B) \cdot A_0 \\ L_B = k_8 \dots \dots \dots \end{array} \right\} \Rightarrow \Delta N \propto \frac{L_0 - L_B}{L_B} \cdot A_0$$

Als het om een drempelcontrast gaat, dan kunnen we dus schrijven:

$$\overline{\Delta N}_{60\%} \propto \epsilon \cdot A_0$$

Wanneer we A_0 uitdrukken in b_0 en l_0 , dan wordt dit:

$$\overline{\Delta N}_{60\%} \propto \epsilon \cdot b_0 \cdot l_0$$

wat wegens de konstant gehouden breedte overgaat in:

$$\overline{\Delta N}_{60\%} \propto \epsilon \cdot l_0$$

F.7. inpassing in een algemene "wet"

Omdat Bouman bij konstante breedte de betrekking

$$\overline{\Delta N}_{60\%} \propto l_0^{3/5}$$

vindt, kunnen we dit nu interpreteren als

$$\epsilon \cdot l_0 \propto l_0^{3/5} \iff \epsilon \cdot l_0 = k_8 \cdot l_0^{3/5} \iff \epsilon \cdot l_0^{2/5} = k_8$$

Bij Lamar vonden we onder deze kondities (konstante breedte en afstand) de waarde $l_0^{.33}$ wat weinig verschilt van de $l_0^{.4}$ bij Bouman. Het verschil ligt vermoedelijk vooral aan het onderscheid in achtergrondluminantie en lichtsamenstelling (Lamar: wit licht).

De overeenkomstige waarde voor "rood" licht en donkerder achtergrond uit Boumans materiaal is $l_0^{.37/20}$ of $l_0^{.35}$. Het is toelaatbaar een gemiddelde uit de Bouman-waarden te bepalen, omdat autokoplichten vooral "rood + groen" licht uitstralen. Substitutie van dat gemiddelde in onze algemene formule geeft:

$$\epsilon \cdot b_0 \cdot l_0^{.38} : s_0^{1.38} = k$$

Voor objecten als wielcirkels houdt dit in dat verdubbeling

van de afstand een 2.6 maal hogere lineaire luminantie zou vergen, gegeven een als geschikt bevonden (drempel)contrast op de enkelvoudige afstand. (Hierbij wordt ervan uitgegaan dat $L_0 \gg L_B$.)

G. SLOT

De aldus uit de magere gegevens afgeleide formule is slechts een richtsnoer voor wielcirkels. Immers, cirkels en ellipsen hoeven zich (vooral i.v.m. de netvliesorganisatie) t.a.v. een drempelcontrast niet zo te gedragen als verticale lijntjes. Nadelig zal hun globaal gezien kleinere totale uitgebreidheid zijn. Voordelig is de grotere redundantie; veel toevallig samenvallende kontoeren e.d. vormen rechtlijnige structuren. Cirkels en ellipsen behoren meestal tot een reëel objekt.

Naast dit alles blijft het probleem bestaan van de bepaling van een absolute waarde als uitgangspunt. Een voorlopige bepaling daarvan, naast een relatieve controle van de hierin afgeleide richtformule, is daarom van groot belang.

AanhangselLijst van symbolen en afkortingen

A	:	grootte van een oppervlak; ook: S.
A_0	:	grootte van het effectief zichtbaar oppervlak van een objekt, in de richting van de waarnemer gerekend; heeft dit oppervlak ter plaatse van het objekt de grootte S_0 , dan is de effectieve grootte $A_0 = S_0 \cdot \cos \varphi$, waarin φ de hoek is tussen de zichrichting en de normaal op het oppervlak.
A_P	:	oppervlak van de oogpupil.
A_R	:	oppervlak van het objektbeeld op het netvlies.
b_0	:	(distale) breedte van een (lijnvormig) objekt.
c	:	lichtsnelheid.
C	:	psychofysisch contrast $\frac{\Delta L}{L_B}$.
C_{dr}	:	minimaal nodig contrast voor vereiste waarnemingskans (gelijk aan ϵ).
cd	:	de eenheid van lichtsterkte, candela (lumen per steradiaal).
$cd \cdot m^{-2}$:	de eenheid van luminantie, candela per vierkante meter.
E	:	verlichtingssterkte, opvallende flux per effectief oppervlak; rekening houdend met richtingsvoorwaarden e.d. geldt $E = \Phi : A = I_0 : s_0^2 = (L_0 \cdot A_0) : s_0^2$.
E_{B0}	:	verlichtingssterkte op het oog afkomstig van een objekt als dit de luminantie van de achtergrond had.
E_{BR}	:	verlichtingssterkte op het netvlies van een objekt als dit de luminantie van de achtergrond had; gelijk aan de verlichtingssterkte op het netvlies zoals opgeroepen door de achtergrond als zodanig.
E_0	:	verlichtingssterkte op het oog afkomstig van een objekt gegeven de geldende luminantie ervan.
E_R	:	verlichtingssterkte op het netvliesbeeld van een objekt gegeven de geldende luminantie van dat objekt.
ΔE_0	:	$E_0 - E_{B0}$
ΔE_R	:	$E_R - E_{BR}$
h	:	konstante van Planck
I	:	lichtsterkte, $I = \Phi : \omega$ of lichtstroom per ruimtehoek uit een "punt" in een bepaalde richting.

- I_{B0} : equivalente lichtsterkte van een uitgebreid objekt, als dit de luminantie van de achtergrond had: $I_{B0} = L_B \cdot A_0 = E_{B0} \cdot s_0^2$.
- I_0 : equivalente lichtsterkte van een uitgebreid objekt gegeven de geldende luminantie van dat objekt: $I_0 = L_0 \cdot A_0 = E_0 \cdot s_0^2$.
- ΔI : $I_0 - I_{B0}$.
- K_λ : coëfficiënt of faktor in lumen per watt, geldend voor een golflengte λ , die uit het vermogen van de elektromagnetische straling door vermenigvuldiging de geldende lichtstroom in lumen oplevert; tabellen geven meestal slechts de (maximale) waarde voor één golflengte m (bij fotopisch zien 555 nm), en een relatieve lijst van waarden V_λ waarvoor geldt $K_\lambda = V_\lambda \cdot K_m \cdot K_m = 680 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$ en $V_m = 1$.
- k : algemene aanduiding voor een konstante waarde.
- k_1 : samengestelde (transmissie-)faktor die bepaalt hoeveel van het licht op de pupil werkelijk het netvlies bereikt; deze doorlaatbaarheid wordt weer bepaald door reflectie en absorptie.
- k_2 : konstante grootte van het pupiloppervlak A_p bij konstant gehouden totaal lichtniveau.
- k_3 : tweedimensionale afbeeldingsmaatstaf voor oppervlakken op het netvlies; bepalend is het kwadraat van de hoekvergroting van het oogstelsel.
- k_4 : benaderingsfaktor die weergeeft hoe binnen een bepaalde range van E_{BR} -waarden de proximale "flanksteilte" wordt bepaald; met name geldt dan bij benadering $\Delta E_{R \max} = k_4 \cdot \frac{\Delta \Phi_R}{A_R}$, terwijl onder deze voorwaarden "flanksteilte" kennelijk evenredig is met $\Delta E_{R \max}$.
- k_5 : lineaire afbeeldingsmaatstaf voor afmetingen op het netvlies; bepalend is de hoekvergroting van het oogstelsel.
- l_0 : (distale) lengte van een (lijnvormig) objekt.
- l_R : lengte van een (lijnvormig) netvliesbeeld.
- L : luminantie, dat wil zeggen equivalente lichtsterkte gedeeld door effectief oppervlak.
- L_B : luminantie van de achtergrond; denkt men de achtergrond in delen, dan geldt voor elk deel (= objekt) de regel voor een objekt als bij L_0 .
- L_0 : luminantie van een objekt $\frac{I_0}{A_0} = \frac{E_0 \cdot s_0^2}{A_0}$.
- ΔL : $L_0 - L_B$.
- lm : lumen, de eenheid van lichtstroom of flux.

- lx : lux, de eenheid van verlichtingssterkte; lumen per vierkante meter.
- MTF : de Modulation Transfer Function die bepaalt hoe een distaal luminantieprofiel wordt getransformeerd naar een proximaal verlichtingssterkteprofiel.
- N : aantal lichtquanta (fotonen) op het oog, afkomstig van een object in een bepaalde tijd t.
- ΔN : aantal lichtquanta op het oog van een object met gegeven luminantie, in tijd t, minus dat aantal als het object de achtergrondluminantie zou hebben.
- $\overline{\Delta N}_{60\%}$: gemiddeld benodigd aantal ΔN in tijd t om een vereiste waarnemingskans van 60% te bereiken.
- R : totale reflektiefactor naar het oog, van een oppervlak in een gegeven situatie; het gereflekteerde licht is R maal het opvallende licht. Voor elke golflengte λ geldt een bepaalde R_λ .
- R_B : reflektiefactor voor een "achtergrondpartij".
- R_O : reflektiefactor voor een "objektpartij".
- s : afstand.
- s_B : afstand tussen oog en achtergronddeel.
- s_O : afstand tussen oog en object.
- S : (onverrekend) oppervlak; na verrekening: A.
- t : beschikbare waarnemingstijd.
- V_λ : verhoudingsfaktor behorend bij een golflengte λ , die door vermenigvuldiging met K_m (zie K_λ) de waarde K_λ oplevert; uitgezet tegen golflengten λ geeft het verloop van V_λ een diagram voor de zogenaamde "ooggevoeligheidsfunctie".
- α : distale afmeting van een object uitgedrukt in termen van de omspannen zichthoek: $\alpha = \frac{l_0}{s}$ of $\alpha = \frac{b_0}{s}$.
- β : minimaal afbeeldingsoppervlak van een "vlekje" op het netvlies.
- β' : minimale afbeeldingsbreedte (van een lijn) op het netvlies.
- ϵ : minimaal nodig contrast voor vereiste waarnemingskans (gelijk aan C_{dr}).
- λ : golflengte van elektromagnetische straling, doorgaans in nanometer; een lichtindruk van betekenis ontstaat bij golflengten tussen 380 en 770 nm.
- Λ : lineaire luminantie; luminantie maal lijnbreedte.

- τ : integratietijd waarbinnen het visuele systeem lichtindrukken "optelt".
- φ : hoek tussen de zichtlijn en de normaal op een oppervlak(-deel).
- Φ : lichtstroom of flux; hoeveelheid licht per tijd.
- Φ_{BP} : lichtflux door de pupil van een objekt als dat de achtergrondluminantie zou hebben.
- Φ_{BR} : lichtflux door het netvliesbeeld van een objekt, als dat objekt de achtergrondluminantie zou hebben.
- Φ_P : lichtflux door de pupil van een objekt met de gegeven luminantie.
- Φ_R : lichtflux door het netvliesbeeld van een objekt met de gegeven luminantie.
- $\Delta\Phi_P$: $\Phi_P - \Phi_{BP}$.
- $\Delta\Phi_R$: $\Phi_R - \Phi_{BR}$.
- ω : ruimtehoek in steradianen; op een boloppervlak van een bol met $r = 1\text{m}$ kan men een oppervlak van $A = 1\text{m}^2$ omlijnen. Stralen uit het bolmiddenpunt door de omtrek van dat oppervlak omvatten een ruimtehoek van $A:r^2 = 1$ steradiaal. Op grotere afstand en voor niet te grote oppervlakken geldt $A_0:s_0^2 = \omega$, gerekend vanuit een punt op afstand s_0 van (effektief) oppervlak A_0 .