

GEZICHTSSCHERPTE, CONTRASTGEVOELIGHEID EN DE ZENUWBEDRADING VAN HET NETVLIES

door

Dr. J. J. Vos en Ir. A. van Meeteren

Midden vorige eeuw, in de tijd dat het natuurwetenschappelijk denken ook de geneeskunde ging beheersen, in de tijd bovendien waarin de leesvaardigheid zich van brede bevolkingslagen meester maakte, kwam er grote behoefte aan een kwantitatieve karakterisering van de visuele prestatie. Snellen (1862) heeft met zijn definitie van de gezichtsscherpte, of Visus, aan de toen gangbare leesproeven de gewenste kwantitatieve basis gegeven. Snellen construeerde zijn letters met een hoogte van 5 x de stokdikte (Fig. 1) en trachtte zo veel mogelijk ook de witte gedeelten de afmetingen van de stokdikte te geven. Naar reeds bekend

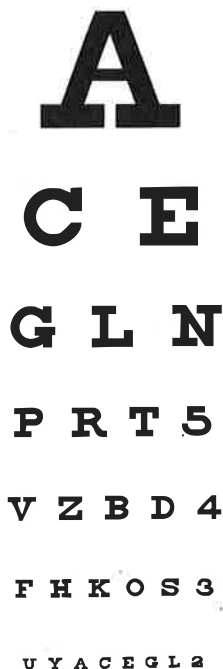


Fig. 1. De originele letterkaart volgens Snellen uit 1862.

Naar een voordracht gehouden voor de Koninklijke Maatschappij voor Natuurkunde "Diligentia" te 's-Gravenhage op 10 februari 1969.

was, is in die omstandigheden het scheidend vermogen van het oog bereikt als de stokdikte onder ± 1 boogminuut wordt gezien. Hierbij aansluitend definieerde Snellen de gezichtsscherpte als de omgekeerde waarde van de voor lezen benodigde gezichtshoek in boogminuten. Kunt u pas een letter lezen met een hoogte van 10 boogminuten – met een stokdikte van 2 boogminuten derhalve – dan hebt u dus een gezichtsscherpte $1/2$. De wijze waarop Snellen het uitdrukte was nog iets anders: hij ging ervan uit dat zijn kaart op 20 voet werd gelezen, en gaf bij iedere kleiner of groter gedrukte regel aan op welke afstand de letters onder de standaardhoek van 5 boogminuten werden gezien. In het voorbeeld van daarnet was dat 40 voet, de gezichtsscherpte in Snellen-notatie dus 20/40.

Dit alles klinkt achteraf vrij banaal, maar toendertijd moet het het ei van Columbus geweest zijn. Snellens definitie werd op slag algemeen aanvaard, zijn kaart een best-seller – of hoe dat toen ook moge hebben geheten. Door de invoering van het begrip gezichtsscherpte heeft Snellen de opkomst van de oogheekkunde ongetwijfeld een grote stoot gegeven. En toch zijn het, als we na zo'n dikke eeuw terug kijken op de ontwikkelingen sindsdien, niet louter woorden van vreugde die wij kunnen laten horen. Want hoeveel nut het scheppen van de term gezichtsscherpte ook moge hebben gehad voor het klinisch spraakgebruik, veel verder dan dat is de toepassing ook niet gekomen. Met name voor een nader begrip van waarom in bepaalde gevallen de visuele prestatie ondermaats blijft heeft de invoering van de gezichtsscherpte maar heel weinig bijgedragen. En dat is achteraf ook wel te begrijpen.

Het maken van een visuskaart is – of althans lijkt – een vrij eenvoudige zaak, en het is daarom niet te verwonderen dat menige oogarts zich al spoedig na Snellens publikatie in huisvljtz gezet heeft aan een verbetering van de Snellen-kaart. Het was al snel duidelijk dat niet alle letters even leesbaar waren, zodat een onnodig element van onzekerheid in de visusbepaling was binnen geslopen. Nieuwe lettertypen deden hun intree, tot de meest bizarre toe. Men vond de indeling van het visusbereik volgens Snellen te grof, en fijn-maziger kaarten verschenen, tot zelfs twintig-regelige toe. Met de doorvoering van het metrieke stelsel verdween de voet, althans op het Europese continent, om plaats te maken voor de meter. Visus 20/40 werd voortaan 6/12 – als er tenminste in de onderzoekkamer 6 meter leesafstand beschikbaar was. Want daarnaast kwam er natuurlijk behoefte aan 5-, en 4-meterkaarten. Daarmee deden dan visusnotaties van 5/10 of 4/8 hun intree. Men zou met deze ontwikkeling vrede kunnen hebben als het resultaat ook een verbetering zou hebben ingehouden, vergeleken met de ontwikkeling van het oorspronkelijke produkt van Snellen. Helaas is daarvan beslist geen spra-

ke. Wat momenteel in de handel verkrijgbaar is heeft een kwaliteit die door vele toevallige factoren wordt bepaald, maar niet of nauwelijks door eisen die men van gebruikerszijde daaraan zou mogen stellen. Stofzuigers worden gekeurd door de KEMA en door diverse consumentenorganisaties, autogordels door RAI-TNO, de weegschaal van de kruidenier door het ijkwezen, maar de leeskaart waarmee wellicht werd afgekeurd voor de grote vaart is door niets of niemand geijkt of gekeurd.

Nu schilderen wij misschien de situatie wat dramatisch af, maar helemaal zonder reden is dat niet. Fig. 2 geeft u een beeld van de zeven A's – tot gelijke grootte uitvergroot, – van een van de meest gangbare testkaarten. Nog in het midden latend hoe ernstig de gezichtsscherptebepaling wordt beïnvloed door de verschillen tussen de letters, mag toch worden gesteld dat de typografische onzorgvuldigheid weinig goeds doet verwachten van de wetenschappelijke verantwoordheid. Fig. 3 illustreert een andere moeilijkheid. De twee fragmenten van visuskaarten geven een indruk van de waarlijk primitieve wijze van aanduiden van de gezichtsscherpte-waarde die men vaak aantreft. Wat de genoemde getallen voorstellen en waarom ze erop vermeld staan kan men slechts via een uitvoerige speurtocht in de literatuur achterhalen. En dan zwijg

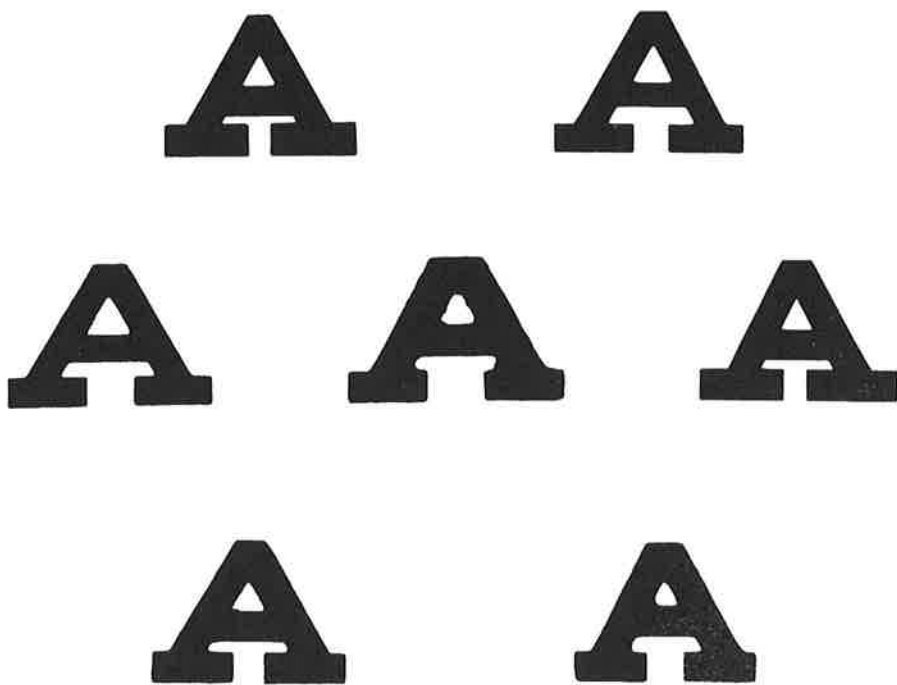
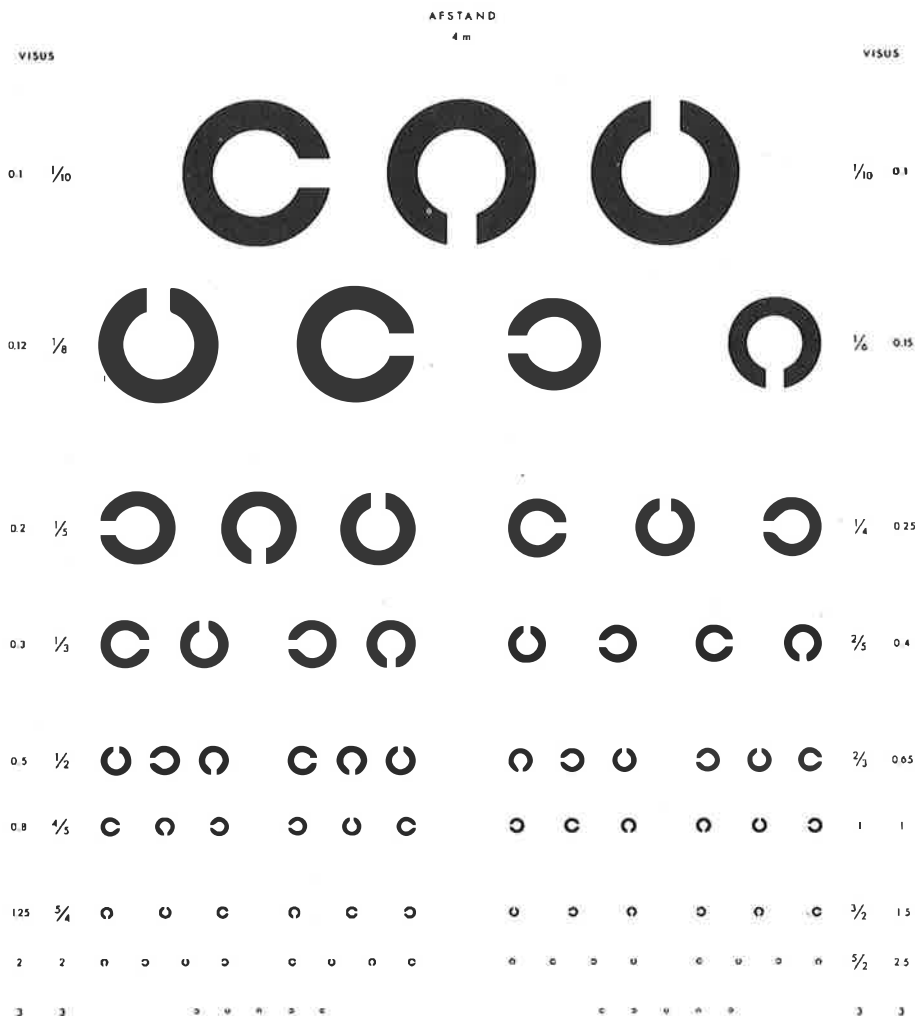


Fig. 2 Zeven A's van de Straub-kaart, uitvergroot tot dezelfde afmeting.



TNO

Fig. 4 Voorlopig ontwerp van een verbeterde visuskaart met Landolt-C's.

van ons gehoor, net zoals men in de elektronica de frekwentiekarakteristiek van een versterker doormeet.

Een dergelijk soort doormeten van het oog is nu ook de laatste jaren in de visuologie in zwang gekomen. In plaats van periodieke sinusoidale drukwisselingen van verschillende (tijds)frekwentie, zoals bij het horen, gebruikt men hier periodieke sinusoidale intensiteitswisselingen van ver-

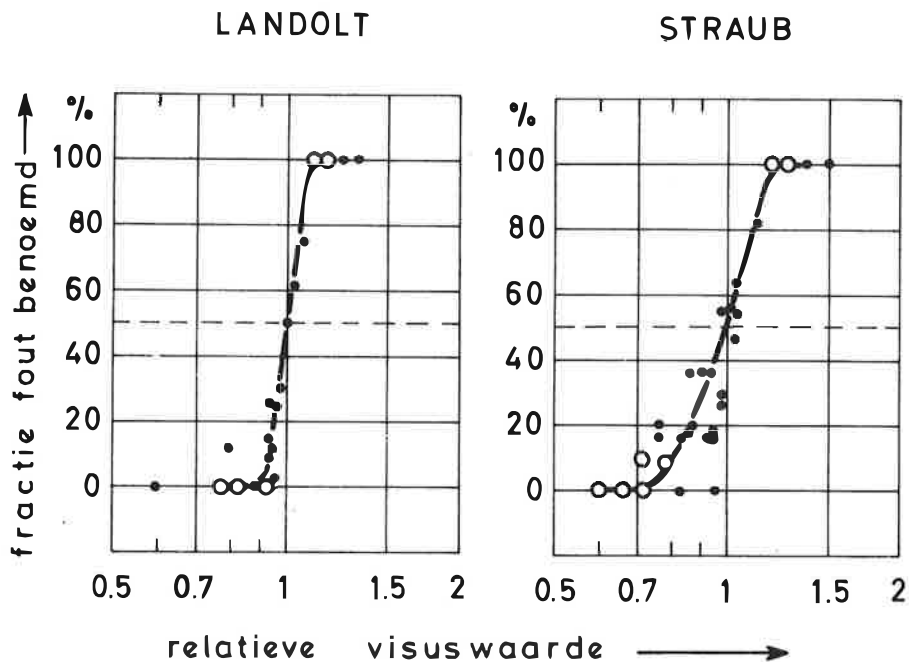


Fig. 5 Foutenscore bij de nieuw ontwikkelde Landolt-kaart en bij de gangbare Straub-kaart.
 ● enkelvoudige meetpunten; ○ meer meetpunten tezamen genomen.

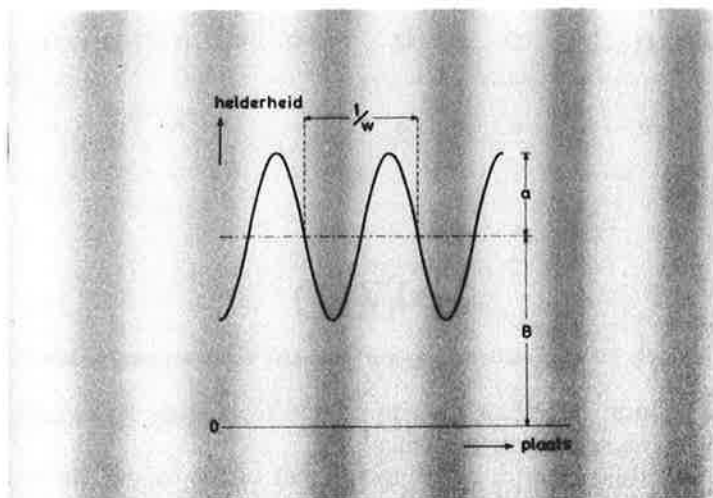


Fig. 6 Testpatroon met sinusvormig gemoduleerde helderheidsverdeling.
 Het helderheidsverloop is grafisch ingetekend.

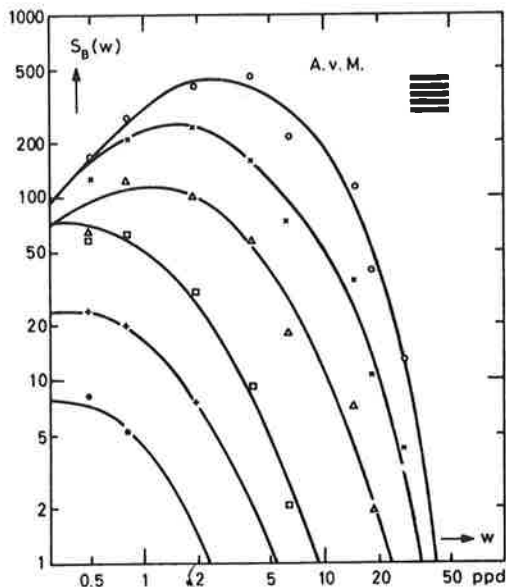


Fig. 7 Kontrastgevoeligheid van een waarnemer voor sinuspatronen, uitgezet als functie van de spatiële frekwentie in perioden per graad. De hoogste kromme is gemeten bij een helderheid van 10 cd/m^2 . Iedere volgende kromme naar beneden is bij een telkens 10 x zo lage helderheid bepaald.

schillende plaatsfrekwenties (Fig. 6). Net als we met pure sinustonen een geluidsinstallatie kunnen doormeten, kunnen we met pure sinuspatronen optiek op zijn kwaliteit beproeven. Net als in de elektronica of in de akoestiek kent men ook in de optiek laagdoorlaatfilters, bandfilters, afsnijfilters enz. En net als men in de audiologie, bij gebrek aan een meetbare uitgang in geval van het horen, zich behelpt met de veronderstelling dat bij de drempel van hoorbaarheid het „uitgangssignaal” constant is, zo veronderstelt men in de visuologie dat, wanneer van een bepaald sinuspatroon de rimpel net op het randje van zichtbaar is, de „uitgang” een constante (zeg 1) is. De contrastoverdracht van het visuele systeem, de verhouding van uitgangs- en ingangskонтраст, wordt dan dus gedefinieerd door de omgekeerde waarde van dat ingangskонтраст, van die ingangsrimpel die juist op de grens van het zichtbare ligt.

Met deze definitie is het mogelijk bij elk helderheidsniveau de spatiële frekwentiekaracteristiek van het visuele systeem door te meten. Men bepaalt eenvoudig die waarde van de ingangsrimpel van een sinusoidaal gemoduleerd helderheidspatroon waarvoor de proefpersoon in 75% van de gevallen de oriëntatie – horizontaal of verticaal – goed benoemt (50% zou puur gokken beteken).

Fig. 7 geeft een schaar van dit soort karakteristieken weer, iedere

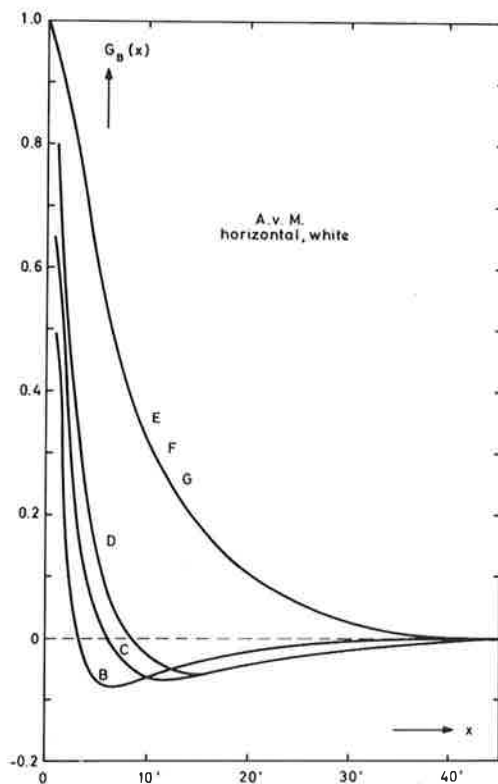


Fig. 8 Het „visuele spleetbeeld”, als bepaald via Fouriersynthese uit de contrastgevoelighedsfunctie. Horizontaal staat de afstand tot het spleetcentrum in boogminuten uitgezet, verticaal de relatieve gewaarwordingssterkte. De krommen corresponderen van rechts naar links met de contrastgevoeligheds-krommen uit Fig. 7 van onder naar boven.

kromme behorend bij een ander helderheidsniveau. Het eerste wat opvalt is dat met toenemende helderheid de contrastoverdracht steeds beter wordt. Men kan dit in eerste orde beschrijven als een omhoogschuiven van de krommes als geheel, met in tweede benadering daarbij een vormverandering, met name bij de hoogste helderheden. Het omhoogschuiven kan men beschrijven als een gevoeliger worden van het gehele systeem, van de detector zo men wil. Men spreekt daarom ook liever van contrastgevoeligheid dan van contrastoverdracht, wanneer het gaat om visuele metingen.

De vormverandering van de krommen wijst op het optreden van neurale processen, van veranderingen in de wijze van verwerken van het optisch signaal in het zenuwnetwerk. Dat dit inderdaad zo is kan worden aangetoond met een ingenieus proefje, als door Arnulf (1960) bedacht. Hij beeldde een spleet af op het netvlies via twee nauwe in-

gangsspleten vlak voor het oog. Daardoor deed hij als het ware de welbekende proef van Fresnel in het oog, en verkreeg hij sinuspatronen op het netvlies die niet door de optiek van het oog zijn beïnvloed. Hij vond dus puur de neurale overdrachtsfunctie. Het enige verschil dat Arnulf met de normale contrastgevoeligheidsfunctie vond, was een wat minder steil verloop van de rechterflank in het puur neurale geval. Blijkbaar doet de oogoptiek niet veel anders dan het afsnijden van de hoge spatiale frekwenties.

Meer inzicht over wat er gebeurt kunnen we putten uit een nog wat andere manier om de meetresultaten te presenteren. Uit de overdrachtsfunctie kunnen we, als bekend, via het proces van Fouriersynthese het uitgangssignaal op een willekeurige ingangsstimulus berekenen. Met name kunnen we het uitgangssignaal berekenen wanneer als stimulus een nauwe spleet wordt aangeboden door de uitgangssignalen op sinuspatronen van alle spatiale frekwenties over elkaar te superponeren. Het resultaat is dan, bij het visuele systeem, het „visuele spleetbeeld” als gedemonstreerd in Fig. 8. Ook hier moet men uiteraard voor elke helderheid een andere kromme geven. Voor lage helderheden vindt men een nette uitsmeerkromme, maar voor hoge helderheden is de — wat smallere — uitsmeerfunctie omzoomd door een zone waarin de stimulering negatief blijkt te zijn.

Dat betekent dat iedere stimulering van het netvlies om zich heen een zone opbouwt waarin de gevoeligheid voor stimulering wordt vermindert. Dat heeft twee belangrijke consequenties. Ten eerste wordt, dat is duidelijk uit de figuur, de beeldscherpte vergroot. En ten tweede wordt door het proces van wederkerige remming een al te snelle groei van de zenuw-signaalsterkte tegengegaan waardoor minder gauw de zenuw tot de top van zijn transportcapaciteit bezet geraakt. Het resultaat is dat het zogenaamd dynamisch bereik van de zenuw wordt vergroot.

Zo'n uitsmeerfunctie vertelt natuurlijk niets essentieel nieuws vergeleken met de contrastgevoeligheidsfunctie waaruit hij werd berekend, maar wel kan deze door het wat ander gezichtspunt beter inzicht geven. Men kan zich nl. voorstellen dat, wanneer men een sinuspatroon aanbiedt met een ritme dat goed past bij de periodiciteit die in de spreidfunctie te onderkennen valt, de zones van remming elkaar gaan versterken, waardoor een soort resonantie-effect kan ontstaan. We vinden dit inderdaad terug in de contrastgevoeligheidskurven van Fig. 7. Elektrofysiologisch zijn er aanwijzingen te over gevonden voor het bestaan van dergelijke effecten van remming op de omgeving. Wij noemen dit hier slechts even om aan te duiden dat de gevonden uitsmeerfunctie een duidelijk somatisch substraat heeft. Men zou dus kunnen zeggen dat psychofysisch de contrastgevoeligheidsfunctie de beste experimentele toegang vormt tot de visuele beeldvorming, maar dat het voor een goed

begrip van de betekenis daarvan nuttig is om deze contrastgevoelheidsfuncties om te rekenen in uitsmeerfuncties, die beter het anatomisch-neurologisch gebeuren weerspiegelen.

Tot slot willen wij nog even terugkomen op de karakterisering van de contrastgevoelheidsfunctie door zijn „hoogte” en „vorm.”

Ruwweg kan men zeggen dat de hoogte de gevoeligheid, de breedte de bandbreedte van het systeem betekent. Dat is echter een ruwe wijze van zeggen, want het is moeilijk bij een gebogen kromme exact van hoogte en breedte te praten. Maar is er een goed gedefinieerd equivalent voor het produkt van breedte en hoogte, van gevoeligheid en bandbreedte, dat men met enig recht als een soort elementaire gevoeligheid van het systeem, als een graad voor de capaciteit tot informatieverwerking kan beschouwen. Men leze dan slechts in plaats van het produkt van hoogte en breedte de oppervlakte onder de contrastoverdrachtskarakteristiek. In Fig. 9 is dit oppervlak uitgezet als functie van het helderheidsniveau. De relatie die uit deze grafiek naar voren komt is bijzonder interessant. Het blijkt nl. dat deze essentiële gevoeligheid,

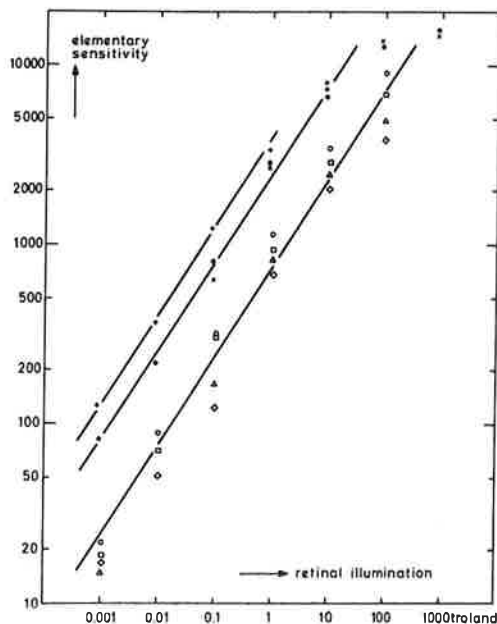


Fig. 9 De „elementaire gevoeligheid”, maat voor de informatietransport-capaciteit van het helderheidssysteem, als functie van de netvliesverlichting. De open punten zijn afgeleid uit eigen metingen, waarvan Fig. 7 een voorbeeld gaf. De andere punten zijn gebaseerd op literatuurgegevens. Wezenlijk is de richting; de lijnen geven de theoretisch ideale wortelrelatie aan.

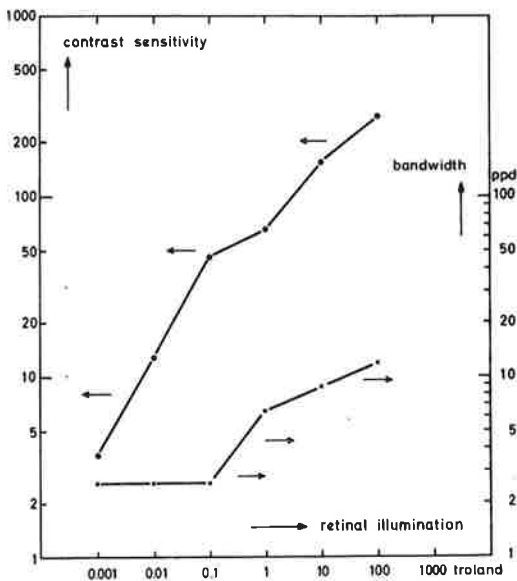


Fig. 10 Opsplitsing van de relatie van Fig. 9 in:
a contrastgevoeligheid als functie van de netvliesverlichting.
b bandbreedte als functie van de netvliesverlichting.
Tussen 0,1 en 1 troland ongeveer vindt de overgang van staafjes- naar kegeltjeszien plaats.

deze informatietransport-capaciteit over een bereik van zeker 5 dekaden in intensiteit evenredig is met de vierkantswortel uit de helderheid. En dit is nu net wat we zouden moeten verwachten als het oog een echte fysische fotonenteller zou zijn die in een meting het aantal fotonen in de donkere en in de lichte partijen moet afwegen tegen elkaar, en in de zekerheid van de uitspraak beperkt wordt door de statistische onzekerheid in die aantallen. De kansrekening leert dat die onzekerheid evenredig is met de vierkantswortel uit het aantal, en op grond daarvan zou dus de experimenteel gevonden relatie van Fig. 9 uitstekend te begrijpen zijn. Dat zou dan meteen betekenen dat het visuele systeem over een enorm helderheidsbereik zo goed als geen informatie verspilt. Wat wel gebeurt, is dat die informatie eensdeels – grotendeels – gebruikt wordt om een betere contrastgevoeligheid te verkrijgen, en anderdeels voor het verkrijgen van een betere beeldscherpte. In Fig. 10 is, zo goed en zo kwaad als dat gaat bij de gebogen lopende contrastgevoeligheidskrommen, getracht deze toename in informatietransport-capaciteit op te splitsen in een toename in gevoeligheid en in bandbreedte. Men ziet dat de toename in bandbreedte zich vooral afspeelt in een zeer beperkt helderheidsgebied, net waar de overgang van staafjeszien naar kegeltjes-

zien plaats vindt. Dit is dan weer een wat andere manier van zeggen van wat natuurlijk al lang bekend was, nl. dat het kegeltjes-systeem meer in het bijzonder op scherp zien, het staafjes-systeem op gevoeligheid gebouwd is.

Afrondend kunnen we stellen dat het niet zo'n wonder mag heten dat de bepaling van de gezichtsscherpte — zelfs met een goede meetmethode — ons niet zoveel over de werking van het oog leert. Blijft het gezichtsvermogen na correctie voor refractie-afwijkingen toch nog beneden verwachting, dan lijkt het meer lonend een nader onderzoek in te stellen naar de contrastgevoeligheid dan naar de scherppte van het visuele beeld. En over die contrastgevoeligheid geeft een gezichtsscherptetest geen uitsluitsel.

Literatuur

Arnulf, A. en Dupuy, O., La transmission des contrastes par le système optique de l'oeil et les seuils de contrastes réiniens. *Comptes Rendus Acad. Sciences* 250, 275, 1960

Snellen, H., *Probuchstaben zur Bestimmung der Sehschärfe* Utrecht, 1862.