

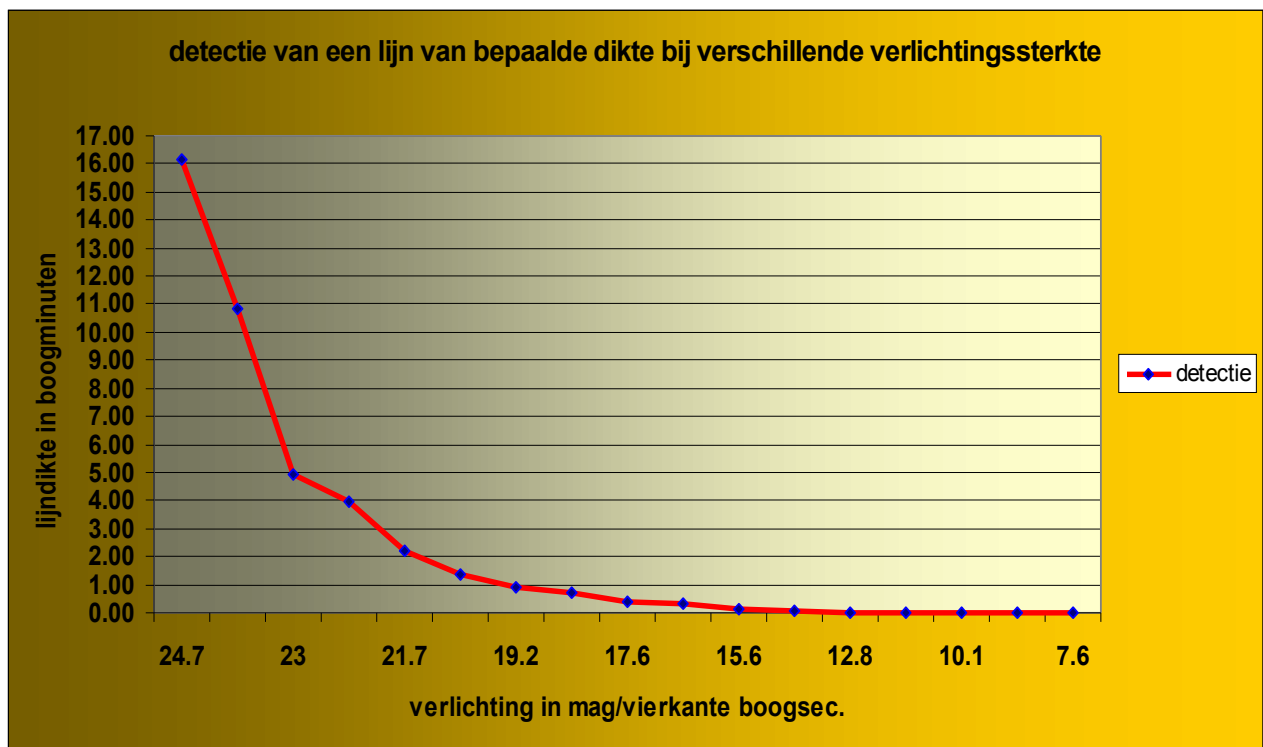
Visueel waarnemen: Achtergrondhelderheid, oplossend vermogen en contrastgevoeligheid van het menselijk oog.

(door Jan van Gastel)

Hoe donkerder de hemelachtergrond, hoe beter lichtzwakke zwakke objecten aan de nachthemel te zien zijn. Er is echter ook een keerzijde aan donkerte: hoe donkerder de hemelachtergrond, hoe meer het vermogen tot 'detectie' van zwakke objecten en het oplossend vermogen (resolutie) van ons oog terugloopt. Ook het contrast van het object met de achtergrond is van invloed op detectie en resolutie. In dit artikel gaan we na, wat dit betekent voor het waarnemen van details op maan en planeten en deepskyobjecten.

Detectie

We spreken van detectie als het er om gaat of we een object, bijvoorbeeld een punt of een lijn, wel of niet zien. Het menselijk oog is in staat om (qua hoekgrootte) hele dunne lijnen waar te nemen, zoals in figuur 1 is te zien¹. Hoe dun de dunste lijn is die we kunnen waarnemen is afhankelijk van de mate van verlichting. Links in figuur 1 is het zeer donker, rechts is



Figuur 1: detectie van lijnen door het menselijk oog

vergelijkbaar met binnenverlichting. De grens tussen waarnemen met de kegeltjes en met de staafjes ligt op ongeveer 18.4 mag/bs^2 , wordt het lichter, dan nemen de kegeltjes het over. De lijn die bij een verlichting van 7.6 mag/bs^2 (binnenverlichting), rechts in figuur 1, nog net te zien was, had een breedte van 0.009 boogminuten, ofwel 0.54 boogseconden². Bij een verlichting van ongeveer 12 mag/bs^2 is de detectielimiet ongeveer 1 boogseconde. Bij heel

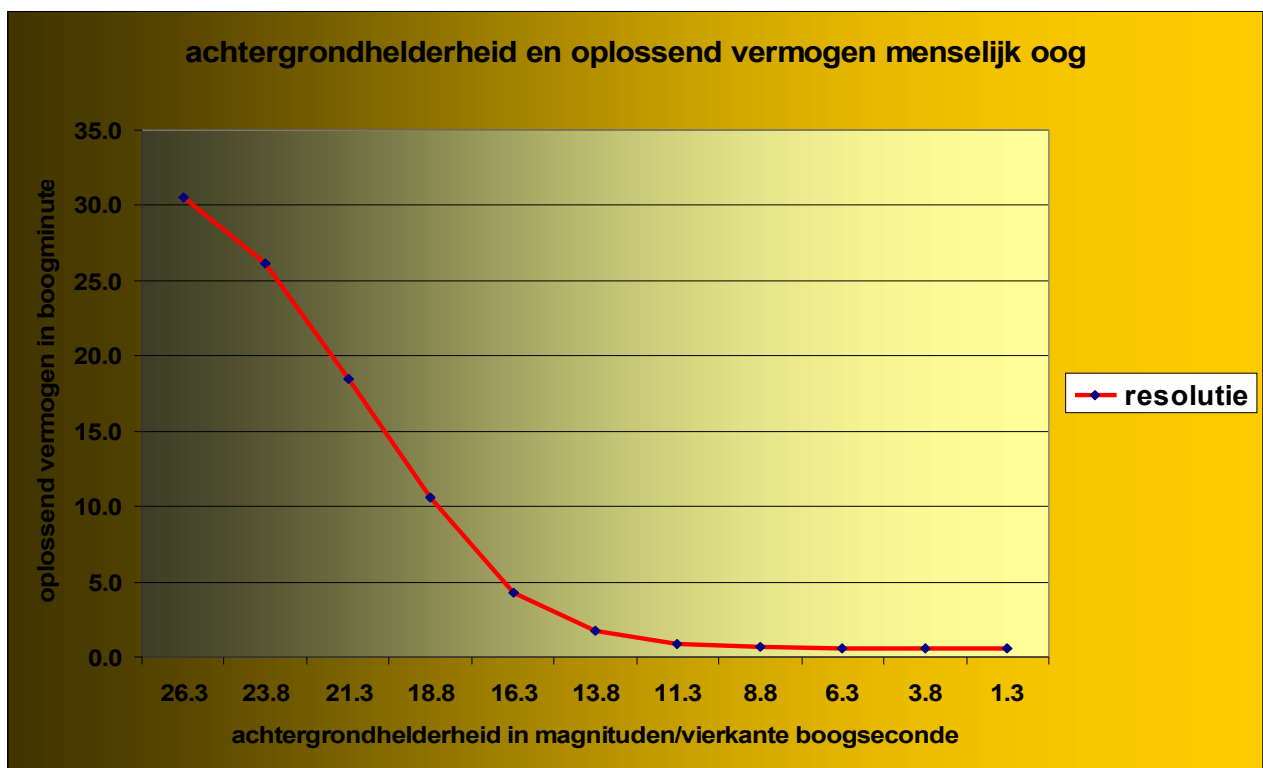
¹ Gemaakt op basis van gegevens van S. Hecht en E.U.Mintz (1939), The Visibility of Single Lines at Various Illuminations and the Retinal Basis of Visual Resolution, The Journal of general Physiology. De 'knikjes' in de lijn zijn toevalligheden, door het kleine aantalproefpersonen.

² Volgens de auteurs van het in de voorgaande noot vermelde onderzoek, worden bij nog helderder (zon)licht, nog kleinere waarden gemeten.

weinig licht, helemaal aan de linkerkant van de grafiek, moet de lijndikte 16 boogminuten bedragen om nog net gedetecteerd te kunnen worden. Er zijn flinke individuele verschillen.

Resolutie

We spreken van resolutie – of oplossend vermogen – als het er om gaat om twee vlak bij elkaar liggende objecten, bijvoorbeeld twee lijnen, gescheiden van elkaar zien. Ook als we een krater op de maan zien als ‘krater’ en niet alleen als een ‘vlekje’, hebben we te maken met resolutie. Het beste is het oplossend vermogen bij daglicht: maximaal ongeveer 0.5 boogminuten³, zoals links in figuur 2 te zien is. Dat scheelt dus ongeveer een factor 60 met detectie. Bij een maximaal donkere hemel van 22 magnituden per vierkante boogseconde, is de resolutie nog 22 boogminuten. En omdat naarmate we sterker vergroten⁴ de achtergrond nog donkerder wordt, neemt net als het vermogen tot detectie, het oplossend vermogen nog verder af, tot meer dan een halve graad bij een donkerte van 27 mag/bs², een donkerte die we onder een donkere hemel bereiken als we waarnemen met een uitreepupil van 0.8 mm⁵.



Figuur 2: relatie tussen achtergrondhelderheid en oplossend vermogen van het menselijk oog.

Er is dus zowel in het geval van detectie als in het geval van resolutie, sprake van twee tegengestelde effecten van vergroten:

1. Door vergroten wordt een bepaald detail in een object beter zichtbaar omdat het licht meer lichtgevoelige cellen (kegeltjes en staafjes) in het oog activeert.

³ Er zijn echter grote individuele verschillen. Bovendien zijn de cijfers aangaande oplossend vermogen gevonden in laboratoriumonderzoek, onder gecontroleerde omstandigheden. De meeste mensen halen in de praktijk niet meer dan maximaal 1 boogminuut.

⁴ Houd er rekening mee, dat ook de telescoop invloed heeft op de uiteindelijke resolutie die we in een concreet geval bereiken. Allerlei optische fouten en bijvoorbeeld een obstructie, hebben een negatieve invloed. Zie ook de literatuur genoemd in voetnoot 12.

⁵ Bijvoorbeeld een vergroting van 250x met een telescoop met een 200 mm objectief.

2. Door vergroten wordt – omdat de achtergrond donkerder wordt – het oplossend vermogen van het oog kleiner⁶, zodat we als we pech hebben het detail toch niet kunnen waarnemen.

Het maximale oplossend vermogen van *de staafjes* ligt rond de 4.5 boogminuten. Dat kan men meten door onderzoek te doen met proefpersonen die het vermogen verloren hebben om met de kegeltjes te kijken⁷. Dat is dus maar ongeveer $1/9^{\text{de}}$ van het maximale oplossend vermogen van de kegeltjes. Maar onder een donkere hemel is het, zoals we hierboven reeds vermeldden, een stuk slechter gesteld met het oplossend vermogen van de staafjes.

Detectie en resolutie

Als figuur 1 met figuur 2 vergelijken, zie we dat het verschil tussen detectie en resolutie aan de linkerkant van beide grafieken – dus in het donker - veel dichter bij elkaar ligt dan aan de rechterkant. Bij 24.7 mag/bs^2 is de detectielimiet (figuur 1) 16 boogminuten en het oplossend vermogen (figuur 2) 27 boogminuten, een verschil van 11 boogminuten. Het detectievermogen is bij die mate van donkerte dus $27/16 = 1.7$ maal zo groot. Een veel kleiner verschil dan aan de andere kant van de beide grafieken, waar bij een verlichting van 7.6 mag/bs^2 het detectievermogen $70x$ zo groot is als de resolutie, namelijk 0.009 versus 0.63 boogminuten. Als het nog donkerder wordt, als we bij hoge vergroting in het oculair kijken en de donkerte rond de 27 mag/bs^2 is, zijn de verschillen tussen detectie en oplossend vermogen minimaal geworden en liggen binnen de orde van grootte van individuele verschillen.

De contrastgevoeligheid van het oog

De figuren 1 en 2 hebben beide betrekking op een situatie van hoog contrast. Resolutie en detectie gaat achteruit naargelang het contrast tussen object en achtergrond lager wordt. We hebben hiermee te maken als we bijvoorbeeld kijken naar zwakke sterrenstelsels of naar ‘vlekjes’ en ‘lijntjes’ op een planeet die slechts weinig tegen de achtergrond afsteken. Bij daglicht nemen we gemakkelijker lage contrasten waar dan ’s nachts als het donker is. Om dit inzichtelijk te maken, maken we gebruik van de ‘*Contrastgevoeligheidsfunctie*’ (Contrast Sensitivity Function). In figuur 3 is deze functie weergegeven⁸ voor een situatie met helder daglicht van 2.6 mag/bs^2 (photopisch), voor schemering, 15 mag/bs^2 , waarin zowel de staafjes als de kegeltjes actief zijn (mesopisch) en voor zeer donker, 25 mag/bs^2 , als achter het oculair alleen de staafjes actief zijn (scotopisch). Te zien is, dat de maximale gevoeligheid voor (laag) contrast onder goede lichtomstandigheden ligt bij een resolutie van omstreeks 12 boogminuten⁹, in de schemering bij een halve graad tot een graad en als we met een flinke vergroting waarnemen onder een donkere hemel, bij ongeveer een tot anderhalve graad.

Gewoonlijk wordt de contrastgevoeligheid onderzocht met een ‘grid’, met lichte en donkere banden die een bepaald aantal ‘*cycles per graad*’ weergeven. Eén ‘cycle’ is de hoekgrootte van een lichte plus een donkere band. Bij een grid van 60 cycles per graad is de hoekgrootte van een lichte plus een donkere band dus $1/60^{\text{ste}}$ graad, ofwel *1 boogminuut*. Ook in figuur 4 -

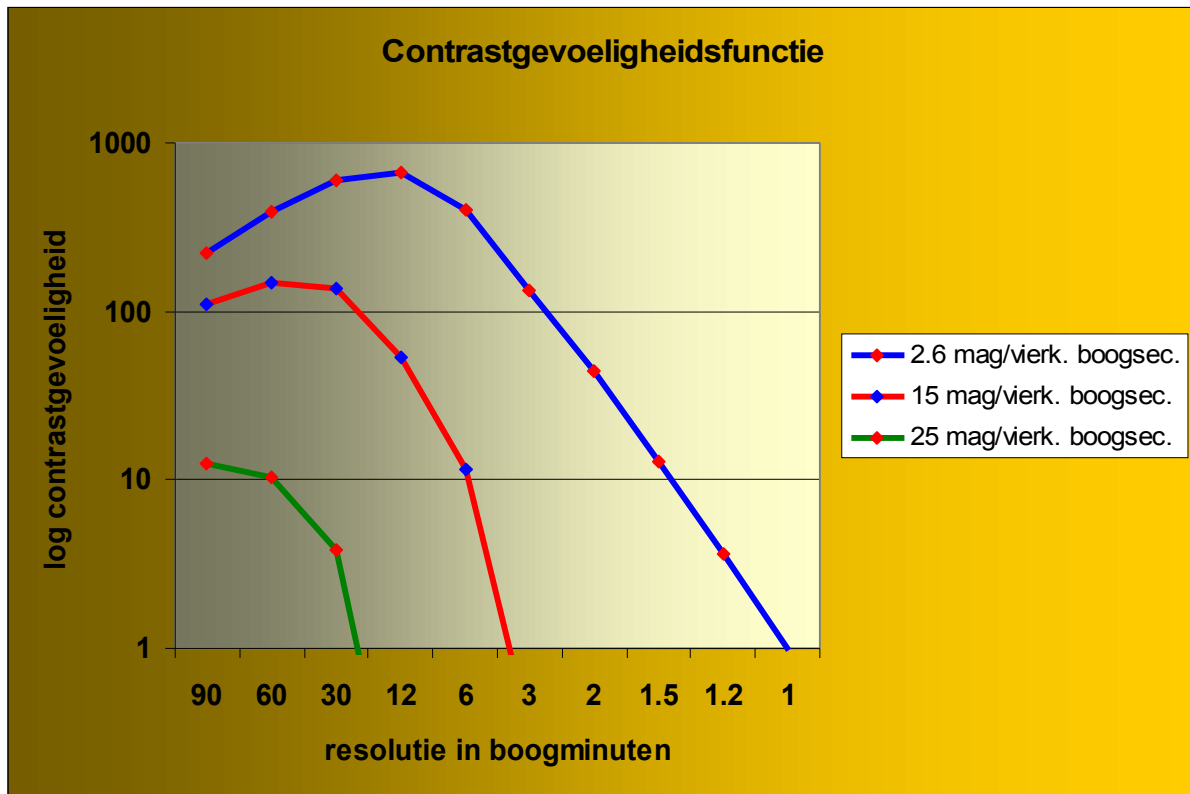
⁶ Strikt genomen gebeurt er niets met het oplossend vermogen van het oog, maar onder ongunstige omstandigheden kan het volledige vermogen niet gerealiseerd worden.

⁷ bij gezonde personen overtreffen de waarneming met de staafjes.

⁸ Gesimuleerd met de formule uit P.G.J. Barten (1990), Evaluation of Subjective Image Quality with the Square Root Integral Method, J. Opt. Soc. Am, 7, 10, October. Voor een overzicht van onderzoek, zie P.J.G. Barten (1999): Contrast Sensitivity of the Human Eye and its Effect on Image Quality. ISBN 0-8194-3496-5 en S. Ajagamelle (2009): Analysis of the difference of Gaussian model in perceptual image difference metrics, Grenoble-INP Pagora (dissertatie).

⁹ Ook erg afhankelijk van individuele verschillen, bijvoorbeeld van leeftijd.

een zogenaamde *Campbell-Robson Contrast Sensitivity Chart*¹⁰ - is te zien, dat contrast niet over de hele grid even goed is waar te nemen¹¹. Aan de bovenkant van de grid, waar het



Figuur 3: Contrastgevoelighedsfunctie photopic (blauw), mesopic (rood) en scotopic (groen)

contrast laag is, zien we de afwisseling van lichte en donkere banen het beste op ongeveer een kwart vanaf de rechterkant van de figuur.

Betekenis voor het waarnemen van maan en planeten

Als we het over ‘achtergrondhelderheid’ hebben, bedoelen we gewoonlijk de hemelachtergrond. Vaak echter, wordt de achtergrond gevormd door het object waarop we een detail willen waarnemen: de maan, een planeet, of een deepskyobject. Maan en planeten zijn zo helder, dat details op die objecten met de kegeltjes kunnen worden waargenomen. Jupiter bijvoorbeeld¹² heeft een oppervlaktehelderheid van ongeveer 5.5 mag/bs², Mars van ongeveer 4 mag/bs², evenals de maan. Dus allemaal zeer dicht in de buurt van het maximale oplossend vermogen van de kegeltjes, zoals we in figuur 1 kunnen zien. Gaan we veel vergroten, zeg tot een uitreepupil van 0.8, dan neemt de oppervlaktehelderheid voor Jupiter af tot 10.5 mag/bs² en voor Mars en de maan tot ongeveer 9 mag/bs². Voor Jupiter neemt het maximale oplossend vermogen van het oog daardoor af tot ongeveer 0.9 boogminuut en voor de maan en Mars tot 0.7 boogminuten, dus allemaal nog binnen het gebied waar het oplossend vermogen van het oog groot is (zie echter ook voetnoot 3).

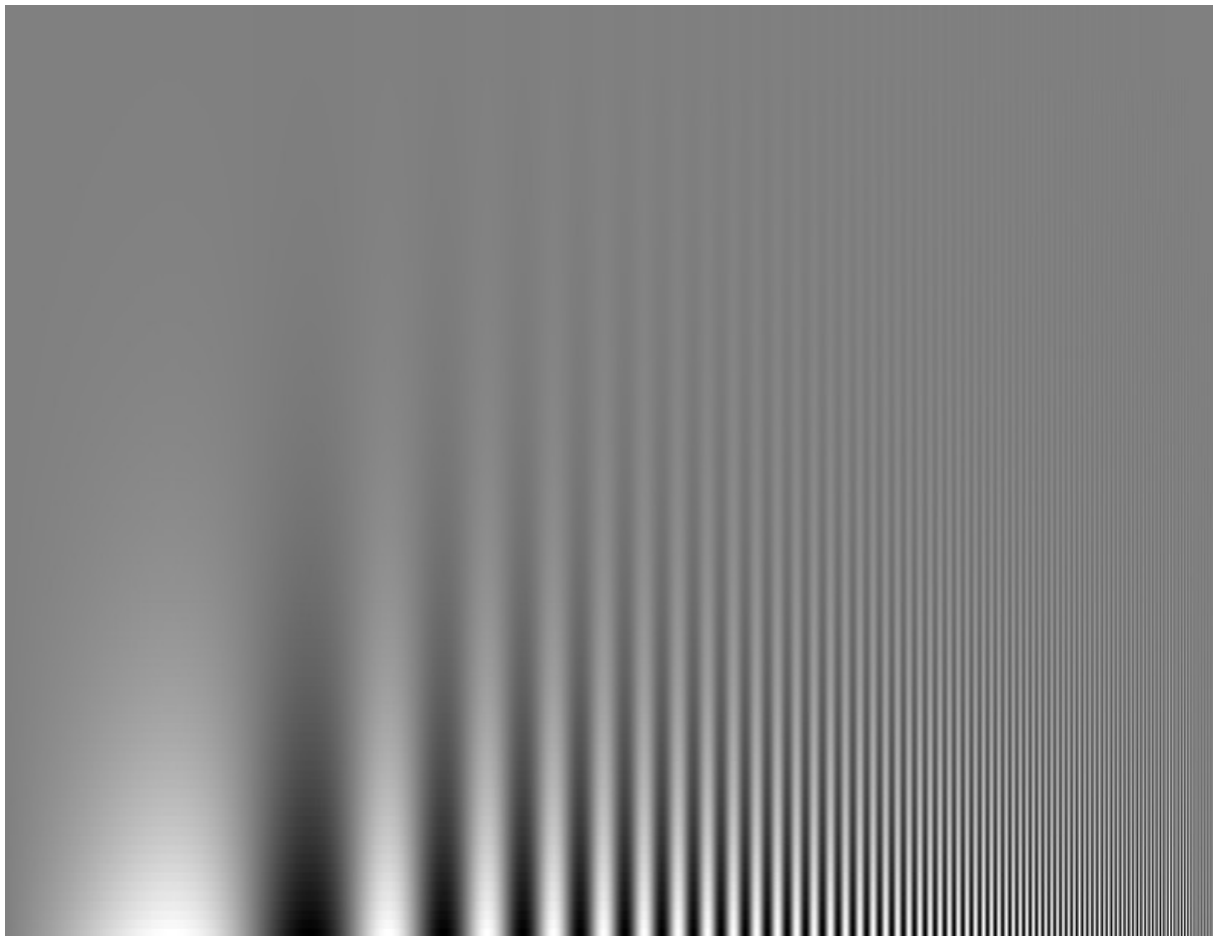
¹⁰ Gratis te downloaden vanaf

http://neurovision.berkeley.edu/Demonstrations/VSOC/izumi/CSF/A_JG_RobsonCSFchart.html .

¹¹ Zie o.a. ook Sukumar et. al. (2010), Study on Threshold Patterns with varying Illumination using 1.3 m Imaging System, Intelligent Information Management, 2, 21-25.

¹² Voor planeten is de oppervlaktehelderheid wel afhankelijk van de schijnbare grootte en de magnitude, maar de in de tekst genoemde waarden geven een goede indicatie.

Zoals we hierboven reeds opmerkten, speelt niet alleen de hoeveelheid achtergrondlicht een rol in het oplossend vermogen van het oog, maar is ook het contrast van het object met de achtergrond waartegen we dat object waarnemen¹³ hierop van invloed. Jupiter steekt met een



Figuur 4: Contrast Sensitivity Chart, met van links naar rechts toenemend aantal cycles per graad

oppervlaktehelderheid van 5.5-10.5 mag/bs² goed genoeg af tegen de hemelachtergrond, ook in een situatie van lichtvervuiling. Maar voor details op Jupiter geldt de oppervlaktehelderheid van Jupiter als achtergrond, waartegen een detail meer of minder goed te zien is, afhankelijk van het contrast met het oppervlak van Jupiter. Stel we willen op Jupiter een detail waarnemen met een diameter van 0.1 boogminuut en een contrast met de achtergrond van slechts 5%¹⁴. Zou alleen de achtergrondhelderheid van belang zijn, wat bij hoog contrast het geval is, dan zou een *ervaren waarnemer met goede ogen* het detail slechts tot ongeveer 1 boogminuut hoeven te vergroten om het zichtbaar te maken, zoals we in figuur 1 kunnen zien. Een flinke verrekijker zou dan volstaan. In figuur 2 en 3 echter zien we dat de piek van de gevoeligheid van de kegeltjes *bij laag contrast* niet in de buurt van het maximum van het oplossend vermogen ligt, maar in de buurt van de 12 boogminuten, erg grote individuele afwijkingen even daargelaten. We zullen het detail dan zoveel moeten vergroten, dat het een hoekgrootte heeft ongeveer 12 boogminuten, dus in dit geval rond de 120 keer. Als het

¹³ Zie ook Rutten en Van Venrooij (1999), *Telescope Optics. A comprehensive manual for amateur astronomers*, Willmann-Bell, Richmond, Virginia, 4^{de} druk, hoofdstuk 18. Figuur 18.8 op pagina 221 geeft een goede samenvatting. Hierin komt zowel het oog als de telescoop aan bod.

¹⁴ Beslist geen uitzondering op planeten al Jupiter en Mars.

oplossend vermogen van je ogen minder goed is dan ‘normaal’, zul je meer moeten vergroten, zijn je ogen bijzonder goed, dan kun je toe met minder.

Betekenis voor het waarnemen van diepskyobjecten¹⁵

Heel veel voor amateurtelescopen bereikbare sterrenstelsels hebben een oppervlaktehelderheid van 20-23 mag/bs². We vinden ze dus, in tegenstelling met maan en planeten, meer naar de linkerkant van figuur 1 en 2, vanaf een oplossend vermogen van 15 tot ongeveer 25 boogminuten. Grote stelsels, zoals M31 (22.5 mag/bs²) en M33 (22.9 mag/bs²) zijn met het blote oog – dus zonder vergroting - te zien (onder een voldoende donkere hemel), omdat het licht van die objecten voldoende de lichtgevoelige cellen in ons oog activeert, maar (zeer) kleine stelsels zullen daartoe voldoende vergroot moeten worden. Door vergroten wordt de achtergrond nog donkerder, waardoor we meer moeten vergroten dan tot de bovengenoemde 15-25 boogminuten. Omdat er gewoonlijk ook sprake is van laag contrast met de hemelachtergrond zullen we kleine, zwakke stelsels vaak moeten vergroten tot een hoekgrootte van een halve graad tot een graad¹⁶ om ze zichtbaar te maken, zoals figuur 2 duidelijk maakt. En als we in die sterrenstelsels ook nog kleine, laagcontrast details willen zien, zullen we zeer veel moeten vergroten om die details zichtbaar te maken. Vergrotingen van 500x of (beduidend) meer met een 50 cm telescoop, zijn geen uitzondering. Om een detail van 0.1 boogminuut te vergroten tot een graad, moet het 600x worden vergroot, waar we voor eenzelfde detail op een planeet slechts rond de 120 keer hoefden te vergroten. Waarmee we de mythe dat voor diepskyobjecten lage vergrotingen volstaan, nogmaals naar het rijk der fabelen verwijzen.

In het middengebied van figuur 1, waarin de kegeltjes actief zijn met een oplossend vermogen van ruwweg tussen de 1.7 en 10 boogminuten, vinden we wat heldere nevels en heldere planetaire nevels. Een mooi voorbeeld is de ‘*Blue Snowball*’ (oppervlaktehelderheid 14.5 mag/bs²) in het sterrenbeeld Andromeda. Alleen al het feit dat we er kleur in zien geeft al aan dat we dit object met de kegeltjes waarnemen, want de staafjes zijn niet gevoelig voor kleur. Andere voorbeelden zijn de ‘*Cat’s Eye Nebula*’ (14.7 mag/bs²) in Draco en de ‘*Saturnusnevel*’ in Aquarius (15.3 mag/bs²). Een nevel die we wat dit betreft als ‘grensgeval’ kunnen beschouwen is de ‘*Orionnevel*’, met een gemiddelde oppervlaktehelderheid van rond de 20 mag/bs². Een grensgeval, omdat sommige delen van deze nevel zo helder zijn – beduidend helderder dan de genoemde 20 mag/bs² - dat we er kleur in kunnen zien, wat aangeeft dat we die delen met de kegeltjes kunnen bekijken. Het oplossend vermogen zal in die heldere gebieden dus ook hoger liggen dan in zwakkere delen van de nevel.

¹⁵ Voor een veel uitgebreidere bespreking van de rol van achtergrondhelderheid, contrast en vergroting bij diepskyobjecten, verwijs ik naar mijn artikel ‘*De zichtbaarheid van uitgebreide diepskyobjecten*’, verschenen in Zenit (december 2007) en Heelal (januari 2008) en dat ook te vinden is op:

<http://members.ziggo.nl/jhm.vangastel/Astronomy/De%20zichtbaarheid%20van%20uitgebreide%20diepskyobjecten.pdf> en naar mijn artikel over het waarnemen van Arp galaxies, op:

<http://members.ziggo.nl/jhm.vangastel/Astronomy/artikelen.htm#Arp> .

¹⁶ Zie bijvoorbeeld Nils Olof Carlin: “Another interpretation of the data from Blackwell, H R (1946): Contrast Thresholds of the Human Eye”, te vinden op <http://w1.411.telia.com/~u41105032/visual/blackwel.htm> .