

E. Vervaet*

DE EERSTE KLEURENBLINDHEIDSPROEVEN**

In vele takken van industrie (auto's, textiel) loopt men niet graag het risico dat een produkt een niet-bedoelde kleur heeft. Het tijdig opsporen van kleurenblindheid is dan gewenst. Op het maatschappelijk en economisch belang van kleurenblindheid werd voor het eerst gewezen in verband met de komst van de trein.¹ Later kregen onderzoek naar het kleurenzien en het ontwerpen van kleurenblindheidsproeven een sterke impuls door de treinramp bij de Zweedse plaats Lagerlunda in 1875. Dat een spoorwegbeambte signalen verkeerd had begrepen, weet men aan diens kleurenblindheid.² Ook de scheepvaart en het leger raakten geïnteresseerd in kleurenblindheidsproeven. Zo schrijft de Duitse oogarts Stilling³ dat het in verband met seinvlaggen in de scheepvaart van belang is geel en blauw van elkaar te onderscheiden.

Stilling ontwierp in 1883 de eerste en nog steeds voor de praktijk meest belangrijke *pseudo-isochromatische* (uitleg volgt halverwege het artikel) kleurenblindheidsproef. In die tijd waren er twee concurrerende scholen om kleurverschijnselen te verklaren: de *theorie van de tegenkleuren* (met als hoofdpersonen Goethe, Hering en Stilling) en de *driekleurentheorie* (met als belangrijkste namen Young, Brewster, Helmholtz en Maxwell). Aan het slot zullen we zien dat de huidige interpretatie van kleurenblindheid teruggaat op Donders' synthese (1881) van beide scholen. Overigens moeten we in verband met het pseudo-isochromatische principe allerlei complicerende factoren, waaronder de verschillende benamingen voor de kleuren, laten rusten.⁴

*Stichting Histos, Hembrugstraat 169, 1013 XD Amsterdam.

**Met dank aan prof.dr. R.A. Crone.

1. G. Wilson, *Researches on colour-blindness* (Edinburgh, 1855) 123-152.

2. De Zweedse oogarts Hedin heeft oude documenten aangaande de ramp opnieuw onderzocht en is tot de conclusie gekomen dat de ramp verklaard kan worden met iemands kleurenblindheid, maar dat een verklaring zonder daar een beroep op te doen aannemelijker is. Zie A. Hedin, "Lagerlundaolyckan 1875 och metodiken för färgsinneprövning", *Särtryck ur Nordisk Medicinhistorisk Årsbok 1976*, 1-6.

3. J. Stilling, "Methoden zur Prüfung des Farbensinnes", *Klinische Monatsblätter für Augenheilkunde* 15 (1877) 168-174.

4. Bedoeld zijn onderwerpen als 'helderheid' en 'verzadiging' van een kleur, verschillende soorten kleurenblindheid (anomalieën en anopieën, erfelijk en verworven) en hun ontdekking, de grotere frekwentie van erfelijke kleurenblindheid bij mannen dan bij vrouwen, de vele verschillende benamingen voor de kleuren en technische details zoals

De rode draad door de wetenschapshistorische feiten is de *onderzoekscyclus*.⁵ In het kort ziet die er als volgt uit. a. Tegenover een houdbaar geacht kader (bijvoorbeeld, 'Schaduw en zijn kleurloos') wordt men verrast ('Deze schaduw toont groen'). b. Die verrassing plaatst men in een verhelderende samenhang ('Dat groen is een weerkaatsing van die dennebomen' of 'Dat groen ontstaat als contrast bij avondrood'). c. Die verklaringspoging trekt men empirisch na met als (definitieve of voorlopige) uitkomst: 'verworpen' of 'aanvaard'. Bij aanvaarding wordt de cyclus opnieuw doorlopen, want een verankerbaar geachte samenhang gaat als nieuw achtergrondkader fungeren, ten opzichte waarvan zich vroeg of laat een volgende verrassing aandient, enzovoort.

De ontdekking van kleurenblindheid

Van kleurenblindheidsproeven kan uiteraard pas sprake zijn als kleurenblindheid is ontdekt. Als we afzien van een paar losse meldingen, was dat in 1776. De oogarts Joseph Huddart uit Cumberland schrijft dat hij in contact was gekomen met twee van de drie gebroeders Harris, die "geen kleuren konden onderscheiden."⁶ De ene had als kind al bemerkt dat "andere mensen iets in voorwerpen zagen, dat hij niet kon zien." Op zijn vierde had hij eens een kous op straat gevonden. Toen hij volwassenen vroeg van wie

belichting bij het afnemen van een kleurenblindheidsproef. Wat die benamingen betreft: die verschillen voor bepaalde kleuren vaak van auteur tot auteur. Zo wordt wat in het artikel als 'purper' wordt aangeduid ook wel eens als 'violet' aangeduid, terwijl het nu consequent gebezigde 'blauw' door sommigen onder meer als 'hemelsblauw' of 'cyaanblauw' wordt gespecificeerd. Voor de diverse kleurencirkels en -diagrammen en voor gekleurde afbeeldingen bij dit artikel zie E. Vervaeke, "Zicht op kleur; een bonte geschiedenis", *Natuur & Techniek* 58 (1990) 636-647. Voor een uitvoeriger weergave van de geschiedenis van kleurenblindheidsproeven en voor een uitwerking van het verband met de onderzoekscyclus zie "Pseudo-isochromatische kleurenblindheidsproeven — I", *Structuur en genese* (1990) 30-39; deel II volgt in *Structuur en genese* (1991).

5. E. Vervaeke, *Strukturalistische verkenningen in kennisleer en persoonlijkheidsleer* (Amsterdam, 1986) 33-38 (de onderzoekscyclus) en 103-124 (de onderzoekscyclus blijkt in overeenstemming met de wetenschapshistorische feiten in verband met zwaartekrachtverschijnselen, van Plato via Copernicus en Newton tot Einstein).

6. J. Huddart, "An account of persons who could not distinguish colours", *Philosophical Transactions* 67 (1777) 260-265. Eerdere meldingen zijn van D. Turberville ("Several remarkable cases in physick, relating chiefly to the eyes", *Philosophical Transactions* 14 (1684) 736-738) en van R. Boyle (twaalfde observatie in "Some uncommon observations about vitiated sight" in *A disquisition about the final causes of natural things* (London, 1688)). Ze bleven echter zonder vervolg. Wanneer men continuïteit als criterium neemt voor begin en vordering van een bepaald onderzoeksveld, dan is Huddart inderdaad de ontdekker. Zoals de tekst leert was hij ook de eerste die met kleurenblindheid experimenteerde. Zie verder noot 33 (Sherman, *Colour vision*) 117-152.

die was, hadden ze het tot zijn verwondering over een *rode kous*, terwijl hij zelf meende dat *een kous* volstond. Een paar jaar later merkte hij dat andere kinderen kersen aan hun kleur herkenden, terwijl hij een kers en een blad slechts uit elkaar hield op grond van de vorm. Bij de andere Harris deed Huddart enkele proeven met een lint dat uit stroken van verschillende kleuren bestond. Zo men wil, dat was de allereerste kleurenblindheidsproef uit de geschiedenis. Harris zei meteen dat het geen effen maar een gestreept lint was, en probeerde de stroken te benoemen. De meest opvallende fout was dat hij over oranje heel zeker zei: "Dit is de kleur van gras; dit is groen." Dat de bekende Duitse dichter, schrijver, politicus en natuurvorser Johann Wolfgang Goethe (1749-1832) wel eens de ontdekker van kleurenblindheid wordt genoemd, is dus niet terecht. Hoe hij voor het eerst van kleurenblindheid heeft gehoord, laat zich echter lastig reconstrueren uit Goethes brieven, dagboek en dergelijke. Ervan uitgaande dat er een brug ligt tussen Huddarts artikel van 1777 en Goethes bekendheid met het verschijnsel kleurenblindheid, kunnen er diverse tussenschakels geweest zijn.

Om te beginnen, Huddarts artikel had internationaal de aandacht getrokken. In 1779 verscheen er een Franstalige samenvatting van, aangevuld met gegevens over het gezichtsvermogen van de dichter Charles-Pierre Colardeau die in zijn vrije tijd graag schilderde, maar niet merkte wat voor "kakelbonte werkstukken" hij op het doek zette.⁷ Dit artikel werd in 1781 kort in het Duits door J.H. Voigt weergegeven.⁸ Voigts artikel opent met de woorden: "Man weiß, daß die Herren Collardeau und Harris so fehlerhaft gebaute Augen hatten, daß ..." en is verschenen in *Magazin für das Neueste aus der Physik und Naturgeschichte*, een door hemzelf en L.C. Lichtenberg uitgegeven tijdschrift. Welnu, met Lichtenbergs vader, de fysicus G.C. Lichtenberg, onderhield Goethe sedert hun ontmoeting in 1783 regelmatig contact, in het bijzonder kort na het verschijnen van Goethes *Beiträge zur Optik* (1791/1792).

Vervolgens is er de mogelijkheid dat Goethe in 1790 van kleurenblindheid heeft gehoord op zijn reis door Italië. In het voorjaar verbleef hij in Venetië, alwaar hij de schilderes Angelika Kauffmann (1741-1807) regelmatig ontmoette. Goethe schrijft dat ze voor hem een schilderij had gemaakt, "ongeveer op de wijze waarop een kleurenblinde de wereld zou zien."⁹

7. "Sur quelques personnes qui ne peuvent distinguer les couleurs", *Observations sur la physique* 13 (1779) 86-88.

8. J.H. Voigt, "Des Herrn Giros von Gentilly Muthmasungen über die Gesichtsfehler bey Untersuchung der Farben", *Magazin für das Neueste aus der Physik und Naturgeschichte* 1 (1781) 57-61. De dubbele 1 in Colardeau's naam bij Voigt, duidt op mondelinge overdracht.

9. J.W. Goethe, "Konfession des Verfassers" in *Geschichte der Farbenlehre* bij het in noot 11 (Goethe, *Zur Farbenlehre*) aangehaalde werk. Uit Goethes dagboek blijkt dat hij op 19 en 26 april 1790 een ontmoeting heeft gehad met Zucchi, Angelika's man.

Ten slotte, Goethe had een intensief contact met J.H. Meyer, schilder en schrijver. Goethe berichtte hem van zijn proeven met de kleurenblinde Gildemeister in zijn brieven van 20 november 1798 en van 12 februari 1799.¹⁰ Deed hij dat omdat kleurenblindheid een onderwerp was dat ze in het bijzonder met elkaar deelden, bijvoorbeeld omdat hij van Meyer van het verschijnsel had gehoord?

Hoe het ook zij, op een gegeven moment wist Goethe af van het verschijnsel kleurenblindheid en trachtte hij het te verklaren. Vanaf 1798 was hij van mening dat mensen die oranje en groen door elkaar gooien, niet over het vermogen beschikken om blauw te zien. Om de lezer enigszins in te voeren in Goethes denktrant, volgt hier in het kort zijn redenering. Groen zou uit geel en blauw bestaan, terwijl oranje een geïntensiveerd geel was: wie geen blauw zag, moest groen en oranje dus wel als dezelfde kleur zien, want alleen de intensiteit verschilde.¹¹ Daarom noemde Goethe wat wij kleurenblindheid noemen, "blauwblindheid".¹²

Hoe was Goethe op 'blauwblindheid' gekomen? Daarvoor moeten we de ontwikkeling van Goethes eigen kleurenleer van nabij volgen. Hij was zijn leven lang zeer in kleuren geïnteresseerd geweest. Bijvoorbeeld, op 10 december 1777 voelde hij zich als in een "feeënwereld" toen hij tegen de avond in een besneeuwd berglandschap afdaalde en *gekleurde schaduwen* waarnam: "Waren er overdag reeds zachte violette schaduwen te zien geweest bij de geelachtige tint van de sneeuw, dan moest men ze nu wel als diepblauw aanmerken toen een intens geel van de beschenen delen weerkaatste. Toen echter de zon op het punt stond onder te gaan en de hele mij omringende wereld met het mooiste purper overtrok, veranderde de schaduwkleur in een groen dat naar zijn helderheid met zeegroen en naar zijn schoonheid met smaragdgroen te vergelijken was."¹³

Verder was Goethe bekend met Newtons theorie over het prismatische spectrum, maar hij had het experimentele bewijs daarvoor nog nooit gezien.

10. *Goethes Briefe* (Weimar, 1893); de brieven staan in chronologische volgorde.

11. J.W. von Goethe, *Zur Farbenlehre* (Stuttgart, 1810); de §§101-113 gaan over kleurenblindheid. Goethe zelf sprak van *Akyanoblepsie*: niet-blauw-zien ('kyanos' is het Griekse woord voor blauw).

12. A. König bekritiseert in zijn artikel "Über Goethe's Bezeichnung der von ihm beobachteten Fälle von Farbenblindheit als 'Akyanoblepsie'" (*Verhandlungen der Physikalischen Gesellschaft in Berlin* 15 (1883) 72-73) Goethe vanwege diens 'blauwblindheid', omdat blauwblindheid (maar dan in de zin van de door König impliciet bedoelde driekleurentheorie) een zeldzaam verschijnsel is. König verdisconteert daarbij ten onrechte niet dat Goethe met 'blauwblindheid' precies die klasse bedoelde die in de driekleurentheorie als groen- en roodblinden worden aangeduid. Beide benamingen dienen dus verstaan te worden vanuit de eigen theoretische context.

13. Zie noot 11 (Goethe, *Zur Farbenlehre*), §75.

Vandaar dat hij wel eens met eigen ogen wilde zien hoe 'wit licht' zoals ook Newton zonlicht noemde, werd uiteengelegd.

Begin 1790 was het zo ver.¹⁴ In de hoop de kleuren van de regenboog te zien richtte Goethe een prisma op een witte wand.¹⁵ "Maar hoe verwonderd was ik toen de door het prisma bekeken witte wand bleef als daarvoor." Hij verwierp Newtons leer onmiddellijk, te meer daar er nog iets was dat hem trof. Op de plaats waar een zwarte strook de wand onderbrak, nam hij namelijk gekleurde banden waar: aan de ene kant geel en oranje en aan de andere kant violet en blauw (fig. a).

b	v		o	g
l	i		r	e
a	o		a	e
u	l		n	l
w	e		j	
	t		e	

Fig. a. Bandenspectrum dat ontstaat als men in een verlichte kamer via een prisma naar een donkere strook op een witte achtergrond kijkt.

Zijn verklaring voor deze banden leidde Goethe af uit de stelling dat alle kleuren door wit en zwart worden verwekt.¹⁶ Dat wil zeggen, het prisma zou het beeld van de zwarte strook op een witte achtergrond hebben verschoven zodat aan de ene kant het witte van de wand onder het zwarte van de strook ligt en aan de andere kant boven. Welnu, zo meende hij verder, wit dat iets zwarts passeert, wordt geel, en zwart dat door iets wits gaat, blauw.¹⁷ Geel en blauw zouden zo de twee basiskleuren zijn. Oranje en violet vatte hij op

14. Zie noot 9 (Goethe, "Konfession des Verfassers"); J.W. Goethe, *Die Annalen*; R. Matthaei, "Über die Anfänge von Goethes Farbenlehre" en "Neue Funde zu Schillers Anteil an Goethes Farbenlehre", *Neue Folge des Jahrbuchs der Goethe-Gesellschaft* 11 (1949) 249-262 respectievelijk 20 (1958) 155-177.

15. Deze handelwijze van Goethe is niet terecht want zo'n proef moet in een donkere ruimte worden gedaan. Toen hij later vernam dat hij Newtons prismaproeven niet juist had geïnterpreteerd, meende hij dat experimenteren in een donkere ruimte te veel rompslomp gaf. Bovendien zouden ook dan licht en donker samen de kleuren verwekken. Newton heeft overigens een aandeel in Goethes misinterpretatie gehad: hij sprak van 'wit licht' als hij 'zonlicht' bedoelde.

16. Deze theorie gaat terug op Aristoteles: wit en zwart of licht en donker zouden in een onderlinge wisselwerking of strijd de verschillende kleuren tot stand brengen.

17. Feitelijk laat Goethe hier ten onrechte het zwart dubbel meetellen: eenmaal niet verschoven en eenmaal wel.

als verdichtingen, oranje van geel en violet van blauw. Groen en purper zouden uit menging ontstaan: van geel en blauw respectievelijk van oranje en violet. Spectraal rood ten slotte zag hij niet als een zelfstandige kleur, want het zou naar geel neigen in de vorm van oranje, dat hij daarom "geelrood" noemde, of naar blauw in de vorm van violet, dat voor hem "blauwrood" was (Zie fig. b).

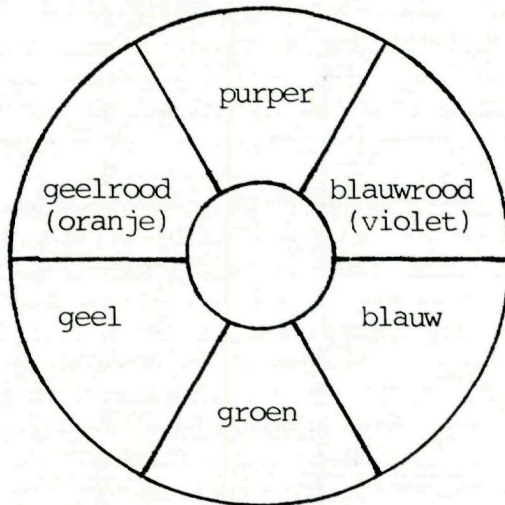


Fig. b. Goethes kleurencirkel (1810).

Met deze theorie kon Goethe tevens verklaren waarom een nevel verafgelegen blauw kleurt en waarom de ondergaande of opkomende zon rood toont: nevel zou als troebel tussenmedium ("die Trübe") iets wits zijn ten opzichte van donkere bergen en iets zwarts ten opzichte van wit zonlicht, met blauw respectievelijk 'geelrood' als resultaat.

Vanaf 1798 zou Goethe drie basiskleuren onderscheiden in plaats van twee: geel, blauw en rood. Dit onderscheid was het sluitstuk van de ontwikkeling die eind 1793, begin 1794 bij hem op gang was gekomen naar aanleiding van gekleurde schaduwen. Zijn aanvankelijke verklaring daarvoor was fysisch van aard. Hij nam aan dat een gekleurde schaduw twee lichtbronnen had: die achter een voorwerp zou de schaduw werpen en de andere zou de schaduw kleuren. Op 15 juli 1793 schreef hij bijvoorbeeld in een brief: "[Deze] kleuren ontstaan door een modificatie van het licht door uitwendige omstandigheden" en "De schaduw wordt kleurloos als men de werking van het tweede licht wegneemt."¹⁰ Zo zou een onbewolkte hemel een schaduw blauw kleuren, een den groen, enzovoort.

Kleurenzien als fysiologisch proces

Er waren twee verschijnselen die Goethe met zijn theorie van 1793 niet kon verklaren: *gekleurde nabeelden* (bijvoorbeeld, na een tijd naar een blauwe cirkel gekeken te hebben ziet men een geel nabeeld als men naar een wit papier kijkt) en *gelijktijdig contrast* (grijs lijkt geel naast blauw — en omgekeerd — en rood naast groen — en omgekeerd). In een brief van 18 januari 1794 merkte Goethe op dat er meer fysiologie bij kleurverschijnselen komt kijken dan men denkt.¹⁰ Zijn aandacht was zich namelijk aan het verplaatsen van licht als *fysisch* verschijnsel naar het oog. Niet wit en zijn wisselwerking met zwart, maar het oog zelf bracht bij nabeelden en gelijktijdig contrast de kleuren voort, zo meende hij. Immers, bij een geel nabeeld was er geen *fysisch* geel, terwijl *fysisch* grijs in de buurt van *fysisch* geel blauw werd *gezien*.

In beginsel kon Goethe kleurenblindheid nu fysiologisch verklaren, bijvoorbeeld met de aanname dat een kleurenblind oog één van de basiskleuren niet waarneemt. Zijn tweekleurenleer schiet dan echter tekort, want bij het wegvallen van een basiskleur zou de wereld er éénkleurig uit moeten zien. De meeste kleurenblinden geven echter te kennen dat ze meer dan wit, grijs en zwart zien. Zo vroeg Huddart Harris of de kleuren die hij zag, verschillende graden tussen wit en zwart waren: “Met enige aarzeling antwoordde hij: “Nee”. Hij dacht wel degelijk dat er nog een ander verschil was.”⁶ Ook zouden kleurenblinden volgens Goethes tweekleurenleer groen en purper als één zien, want groen zou een mengsel zijn van onverdicht geel en blauw, en purper van verdicht geel en blauw. Ook dit strookte niet met de feiten.

Goethe en Friedrich von Schiller (1759-1805) werden na hun kennismaking in juli 1794 goede vrienden. Kleurverschijnselen waren een terugkerend onderwerp van gesprek en van briefwisseling. Welnu, op 15 november 1798 herduidelde Schiller de door Goethe kwantitatief opgevatte verdichtingen (van geel tot oranje en van blauw tot violet) in kwalitatieve zin. Schiller veronderstelde namelijk dat in verdichtingen rood als een nieuwe kwaliteit ontstond. In zijn werk *Über die ästhetische Erziehung des Menschen* (1795) wendde hij een analoge gedachte aan over het begrip ‘schoonheid’. Zo veronderstelde hij dat het oorspronkelijke ervaren (onder meer dat van kinderen) uiteen viel in denken en beleven. Weliswaar zouden die elkaars tegengestelden zijn, maar ze zouden elkaar ook kunnen doordringen. Vanuit die wisselwerking zouden denken en beleven samen schoonheid voortbrengen en zo hun aanvankelijke tegenstelling opheffen door hun vereniging in een doorleefde in plaats van oorspronkelijke ervaring: “[We moeten] deze verbinding zo zuiver en volledig doorvoeren, dat beide toestanden [van denken en beleven, EV] geheel in een derde toestand verdwijnen en geen

spoor van de deling in het geheel overblijft.”¹⁸

Deze gedachtengang vertaalde Schiller naar Goethes kleurencirkel. Immers, als men ‘oorspronkelijk ervaren’ door groen vervangt en denken en beleven door geel en blauw, dan vervult schoonheid de rol van rood en doorleefde ervaring die van purper, want beide zouden voortkomen uit een de bestanddelen verheffende wisselwerking, tussen denken en beleven respectievelijk tussen geel en blauw. Schiller paste in beide gevallen dus dialectische wetten toe zoals het wederzijds doordringen van tegengestelde polen en het voortduren van een nieuwe kwaliteit door die doordringing (en geen wederzijdse neutralisering van de polen).¹⁹ Het eind van de 18e eeuw was immers de kraamkamer van de dialectiek en naast mensen als Fichte en Schelling, met wie Schiller geregeld contact had, speelde ook Schiller daar een bescheiden maar niet onbelangrijke rol in.

Schillers suggestie dat rood als derde basiskleur uit een wisselwerking tussen de basiskleuren geel en blauw voortkwam, viel bij Goethe in goede aarde, want hij zat al op een dialectisch spoor. Wisselwerkingen tussen tegengestelde behoorden tot de kern van zijn kleurenleer: wit versus zwart (en hun verwekking van de kleuren), geel versus blauw (en hun verbinding tot groen), oranje versus violet (en hun verbinding tot purper), enzovoort. Ook had hij vanaf de zomer van 1798 gepoogd een dialectische verdieping te geven aan zijn kleurenleer, want in magneten met hun twee onlosmakelijk verbonden polen begon hij toen het prototype te zien van de dualiteit in alle natuurverschijnselen, zoals die ook tot uiting kwam in kleuren die elkaar opriepen in nabeelden en zo meer. Hij vermoedde “dat de kleurige natuurwerkingen evenzeer als de magnetische en de elektrische op een dualiteit of een polariteit berusten.”²⁰

Na Schillers suggestie dekte Goethes kleurenleer alle kleuren, ook het rood dat er voordien geen zelfstandige plaats in had, en kon Goethe kleurenblindheid bevredigend verklaren als een onvermogen om blauw waar te nemen. Hij schreef: “[Schiller] was het die de twijfel oploste, die me lange tijd had opgehouden: waarop dan toch dat wonderlijke weifelen berust, dat bepaalde mensen de kleuren verwisselen.”²¹ Op 15 november 1798 had Schiller ook geopperd dat kleurenblinden geen blauw zien.

Die verklaring wilden Goethe en Schiller zo spoedig mogelijk natrekken. Ze

18. F. Schiller, “Über die ästhetische Erziehung des Menschen”, 18e brief, *Die Horen* (1795).

19. Soortgelijke verbanden werden later door G.W.F. Hegel neergelegd in zijn *wet van de knooppunten* en door F. Engels in zijn *wet van de omslag van kwantiteit naar kwaliteit bij veranderende kwantiteit*.

20. J.W. Goethe in zijn in augustus 1798 geschreven inleiding bij de *Propyläen*.

21. J.W. Goethe, *Tag- und Jahreshefte* onder 1798.

kenden een student, Gildemeister, die kleuren verwisselde. Op 19 november 1798 hielden ze hem verschillende kleuren voor en zijn reacties bevestigden hun vermoeden.²² Zo nam hij kleuren waar geen blauw in voorkwam (grijs, bruin, oranje) ongestoord waar, terwijl ook zijn ogen de kleur rood zagen: "Vermiljoen verklaart hij stellig voor rood; op de vraag of hij niets geels daarin ziet, zei hij ja" en "Elk verdicht geel scheen hem dus rood." Maar blauw, al dan niet verdicht, nam hij niet waar: "hij schijnt geen groen te zien, maar in plaats daarvan een geelrood" en "in tamelijk zuiver gemengd groen wilde hij iets blauwachtigs erkennen." Men bedenke hierbij dat Goethe groen opvatte als een mengsel van geel en blauw. Ook in latere gevallen van 'blauwblindheid' zag hij een bevestiging van zijn opvattingen over kleuren.²³ Al met al meende Goethe zich in 1810 een beeld te kunnen vormen van hoe een kleurenblinde de wereld zag: de kleuren in een zomers tafereel zouden op hem eenzelfde indruk maken als herfstkleuren.¹¹

Tegen- en verwisselingskleuren

Natuurkundigen wezen Goethes kleurenleer hartgrondig af, mede omdat hij Newtons kleurentheorie fel bestreed. Bovendien bleek het vruchteloos Goethe erop te wijzen dat hij Newtons prismaproeven verkeerd had geïnterpreteerd.¹⁵ Bijval kreeg hij slechts van de filosoof Arthur Schopenhauer (1788-1860) (in diens *Über das Sehnen und die Farben*, 1816) en van de fysiologen Johannes Müller (1801-1858) en Jan Purkinje (1787-1869). De dialectische kleurenleer zou pas in 1874 weer volop in de belangstelling staan door toedoen van Ewald Hering (1834-1918), die in 1870 Purkinje was opgevolgd als hoogleraar in de fysiologie aan de Universiteit van Praag. Onder meer door het werk van diezelfde Müller en Purkinje had de fysiologie in de loop van de vorige eeuw aanzienlijke vooruitgang geboekt. Voor ons betoog is de bijdrage van de Duitse fysioloog Ludimar Hermann (1838-1914) van belang. Deze verklaarde de krachtwerking van spiervezels cyclisch: in een gistingproces zou een vezel zich spannen en verkorten, terwijl verslapping en verlenging zouden intreden tijdens de aanmaak van nieuwe giststof. In 1867 nu achtte Hermann deze verklaring empirisch aangetoond. Welnu, Hering breidde Hermanns benadering uit: alle biologische verschijnselen zouden op twee tegengestelde processen berusten. Beperkt tot het zien van kleuren merkt Hering allereerst op dat het menselijke oog in violet rood en blauw herkent (net als in grijs, wit en zwart)

22. *Goethes Naturwissenschaftliche Schriften*, 5 (Weimar, 1906) II, 29-38 (*Paralipomena IX: Pathologische Farben*). Hierin is ook het verslag van de proeven op 12 en 14 februari 1799 opgenomen.

23. Zie bijvoorbeeld R. Matthaei ed., *Goethe, Die Schriften zur Naturwissenschaften*, 3 (Weimar, 1951) I. Abteilung, 279v.

en dat er net als tussen rood en blauw ook tussenkleuren bestaan tussen blauw en groen, tussen groen en geel en tussen rood en geel.²⁴ Daarna stelt hij vast dat tussenkleuren ontbreken tussen rood en groen en tussen blauw en geel: roodachtig groen of groenachtig rood bestaat net zo min als blauwachtig geel of geelachtig blauw. Maar het mengen van geel en blauw geeft toch groen? Zeker, meent Hering, maar zuiver groen is een zelfstandige sensatie want we zien er geen afzonderlijk blauw en geel in. Mocht iemand dus in de verleiding komen toch van blauwachtig geel of geelachtig blauw te spreken, dan doelt hij volgens Hering op blauwachtig groen respectievelijk geelachtig groen.

Het niet bestaan van overgangen tussen rood en groen en tussen geel en blauw, waarin de bestanddelen nog afzonderlijk te herkennen zijn, is voor Hering iets merkwaardigs want de andere vier combinaties hebben wel geleidelijke overgangen. Hij neemt daarom vier basiskleuren aan: rood, blauw, groen en geel, die twee aan twee bij elkaar horen: rood en groen, en blauw en geel. Wat die vier basiskleuren betreft sloot Hering dus net als Goethe aan bij de ervaring van de schilders, in het bijzonder bij Da Vinci's vierkleurenleer van 1519.²⁵

Dan neemt Hering in navolging van Hermanns theorie over de werking van spierweefsel twee gezichtsstoffen aan: rood-groen-stof en blauw-geel-stof. Afbraak van de rood-groen-stof zou in een rood-sensatie resulteren en opbouw in een groen-sensatie. Op analoge wijze leidt afbraak van de blauw-geel-stof in een geel- en opbouw in een blauw-sensatie. Daarmee is dus verklaard waarom we nooit rood en groen of blauw en geel tegelijk zien: een gezichtsstof kan niet terzelfder tijd worden opgebouwd en afgebroken. Zo leidt toevoeging van groen bij rood tot een *verminderde* afbraak van de rood-groen-stof. Als afbraak en opbouw in balans zijn, zouden we een kleurloze indruk hebben, vergelijkbaar met het zien van wit.

Hering noemde rood en groen, maar ook blauw en geel elkaars *tegenkleuren*.²⁶ Volgens de *theorie van de tegenkleuren* neutraliseren twee gelijktijdig aangeboden tegenkleuren elkaar omdat ze op de werking van één gezichtsstof berusten, terwijl alle andere tweetallen kleuren een tussenkleur geven omdat beide gezichtsstoffen dan in het spel zijn. Bijvoorbeeld, oranje verschijnt als beide worden afgebroken. Verder zijn met deze theorie

24. E. Hering, "Grundzüge einer Theorie des Farbensinnes", *Wiener Berichte* (3) 70 (1874) 169-204; opgenomen als hoofdstuk 6 in E. Hering, *Zur Lehre vom Lichtsinne* (Wenen, 1878) 107-141.

25. Leonardo da Vinci, *Trattato della pittura* (1519).

26. Hering vatte wit en zwart ook als kleuren op; er was dan ook een derde gezichtsstof volgens hem: de wit-zwart-stof zou bij afbraak met een wit-sensatie corresponderen en bij opbouw met zwart.

verschijnselen als gekleurde nabeelden en gelijktijdig contrast gemakkelijk te verklaren, namelijk als een herstel van een verstoorde balans tussen opbouw en afbraak van een gezichtsstof. Wanneer men bijvoorbeeld lange tijd naar een geel vlak staart, zou de blauw-geel-stof overmatig worden afgebroken. Zodra men dan naar een grijs vlak kijkt, zou die stof snel weer worden opgebouwd, hetgeen met een blauwe sensatie overeenkomt.

Hering onderscheidde drie soorten kleurenblindheid, twee partiële en één totale: rood-groen-blindheid, blauw-geel-blindheid en totale kleurenblindheid. Deze zouden ontstaan wanneer de rood-groen-stof, de blauw-geel-stof respectievelijk beide ontbreken.²⁷

De eerste die de theorie van de tegenkleuren aanwendde voor het bepalen van de kleurzin, was niet Hering zelf, maar de al aan het begin genoemde Jakob Stilling (1842-1915). Deze vatte Herings theorie in twee punten samen en schreef de ontdekking ervan niet aan Hering maar aan Goethe toe: "1. De menigvuldigheid van onze kleursensaties kan in vier grondsensaties worden ontbonden, rood, groen, blauw en geel. 2. Deze beide kleurenparen — zuiver als sensaties beschouwd — staan in een antagonistische verhouding tot elkaar."²⁸ Goethes 'blauwblindheid' komt dus grofweg overeen met Herings rood-groen-blindheid, al staan de verklaringen en de terminologie haaks op elkaar.²⁹

Ook gaat Stilling na welke de gebruikelijke methoden zijn om iemands kleurzin te meten: het sorteren van gekleurde monsters (meestal stukjes wol of stroken papier) of het vergelijken van spectrale kleuren. In beide moet een proefpersoon kleuren uiteindelijk benoemen, wat Stilling een groot nadeel acht.³⁰ Zo merkt hij over sorteren op dat "kleurenblinden door ervaring hebben geleerd dat niet-kleurenblinden iets de ene keer rood noemen, wat

27. Zie noot 24 (Hering, *Zur Lehre vom Lichtsinne*) 136v en E. Hering, "Zur Erklärung der Farbenblindheit aus der Theorie der Gegenfarben", *Lotos* 29 (Neue Folge, 1) (1880) 76-107.

28. J. Stilling, *Über Farbensinn und Farbenblindheit* (Cassel, 1878) 11v.

29. Een ander verschilpunt is de verhouding tussen blauw en zwart en tussen geel en wit. Voor Goethe zijn blauw en geel modificaties van zwart respectievelijk wit, terwijl voor Hering het zien van blauw en het zien van zwart op andere gezichtsstoffen berusten (net zoals het zien van geel en dat van wit). Zie ook noot 26. Stilling keert echter terug naar de Goethiaanse verwantschap tussen zwart en blauw, maar hij duidt die anders. Hij verklaart die verwantschap niet uit enige modificatie door een medium, maar beroept zich op het mengen door schilders. Hij stelt namelijk dat geel en en blauw groen geven; zie noot 28 (Stilling, *Über Farbensinn*) 30v. In plaats van zwart moet dat heel donkerblauw geweest zijn. Dat is inderdaad lastig van zwart te onderscheiden vanwege de geringe lichtintensiteit van beide.

30. Daar hield de Duitse natuurkundige Seebeck al in 1837 rekening mee; zie A. Seebeck, "Über den bei manchen Personen vorkommenden Mangel an Farbensinn", *Annalen der Physik und Chemie* 42 (1837) 177-233.

hen geel voorkomt, en de andere keer iets rood noemen, wat hen blauw toeschijnt." Hij concludeert: "Als men de sensaties van kleurenblinden wil bestuderen, moet men zich dus onafhankelijk maken van hun oordeel."

Hij meent dat een onderzoeksmethode die op gekleurde schaduwen berust, aan die eis voldoet. Immers, volgens de theorie van de tegenkleuren ziet een rood-groen-blinde een schaduw niet van kleur veranderen met rood licht als tweede lichtbron (niet-kleurenblinden zien dan een groene schaduw). Proefpersonen "moeten dan alleen maar aangeven of ze een kleur op de schaduw waarnemen of niet." Of iemand die schaduw nu zwart, groen of nog wat anders noemt, doet niet ter zake. Het antwoord 'ja' of 'nee' is voldoende: 'ja' betekent dat bij iemand de rood-groen-stof aanwezig is en 'nee' duidt op afwezigheid daarvan.

Een andere benoemingsonafhankelijke methode is het laten onderscheiden van gekleurde figuren op een achtergrond in de tegenkleur. De reden is dat een blauw-geel-blinde volgens de theorie een gele letter op een blauwe achtergrond niet kan lezen. Stilling noemt geel en blauw dan *verwisselingskleuren*. Zo zijn ook de tegenkleuren rood en groen elkaars verwisselingskleur. Hetzelfde geldt voor oranje en blauwachtig groen en voor purper en geelachtig groen, mits per kleur de basiskleuren in de juiste verhouding zou gemengd.

De mogelijkheid om met verwisselingskleuren iemands kleurzin te bepalen is voor het eerst door Stilling in 1876 geopperd. De afbeeldingen die erop gebaseerd zijn, heten *pseudo-isochromatische platen*. (De term 'pseudo-isochromatisch' betekent: in schijn (voor een kleurenblinde in werkelijkheid) dezelfde kleur hebbende.) In zulke platen verdwijnt de figuur voor een kleurenblinde dus in de achtergrond. Stilling stelde ze samen met medewerking van "intelligente kleurenblinden" als leraren, kunstenaars en artsen. Overigens bleek al gauw dat blauw-geel-blindheid zeldzaam was. Zo schrijft hij dat hij de eerste volkomen blauw-geel-blinde in 1878 op het spoor was gekomen en de tweede pas in 1894.³¹

Stilling koos eerst een kleur voor de figuur. Deze hield hij dan naast kleuren die in de buurt van de veronderstelde tegenkleur lagen. Op grond van de terugkoppeling van de kleurenblinde mengde hij diverse kandidaten voor de verwisselingskleur, net zo lang tot zijn compagnon hem verzekerde dat hij geen onderscheid meer zag tussen de vergelijkingskleur en het mengsel. Met zo'n paar verwisselingskleuren componeerde hij dan later figuur-achter-

31. J. Stilling, "Über Entstehung und Wesen des Anomalien des Farbensinnes", *Zeitschrift für Psychologie und Physiologie der Sinnesorgane* 44 (1910) II. Abteilung, 402. Deze 'blauw-geel-blinden' verwisselen echter andere kleuren dan geel en blauw. Om één en ander net zo nauwkeurig vast te kunnen stellen als we dat nu zouden kunnen doen, waren Stillings platen ontoereikend.

grondplaten. In tegenstelling tot zijn latere platen bestonden de eerste niet uit onregelmatige vlekkenpatronen. Die introduceerde hij pas nadat was gebleken dat kleurenblinden de figuren toch konden lezen, namelijk vanwege de scherpe begrenzing tussen figuur en achtergrond.

Er volgden nog vele verbeteringen, niet alleen van hemzelf, maar ook van anderen. Naast de latere bewerkers van zijn platen (zoals Hertel en Velhagen) moet vooral Shinobu Ishihara, hoogleraar in de oogheelkunde aan de Universiteit van Tokio, worden genoemd. Zijn eerste pseudo-isochromatische platen stammen uit 1917. Een belangrijke vernieuwing die hij doorvoerde, was dat een figuur niet slechts verdween: er kwam een ander figuur voor in de plaats. Zo ziet een rood-groen-blinde op een bepaalde Ishihara-plaat in plaats van '57' '35'.³² Om zo'n metamorfose te bereiken paste Ishihara het pseudo-isochromatische principe twee maal toe, namelijk door twee paren verwisselingskleuren in één plaat te verwerken. Zo koos hij voor de 57 twee rood-tinten, waarvan de één naar geel en de ander naar blauw neigde, en voor de achtergrond twee groen-tinten, waarvan eveneens de één naar geel en de ander naar blauw neigde. Welnu, de beide geelachtige tinten worden door de kleurenblinde als één kleur gezien en dat geldt ook voor de beide blauwachtige tinten. Aldus werd voorkomen dat een kleurenblinde die wilde simuleren en wantrouwig was geworden door het ontbreken van een figuur in een verdwijningsplaat, op zoek ging naar andere verschillen (in de vorm van de vlekken, in helderheid) om zo een figuur te ontdekken.

Kleuren als vectoren

Recente verbeteringen stoelen niet op de theorie van de tegenkleuren, maar op de *driekleurentheorie*. Voor een uitvoerige weergave van die geschiedenis zij naar elders³³ verwezen. We schetsen er hier enige hoofdmomenten uit.

32. Ishihara onderscheidt hierin groen- en roodblinden. Dat deed hij in zekere zin in navolging van Helmholtz, al werd zo'n onderscheid door Helmholtz anders geduid dan binnen Herings school. Overigens zien zowel groen- als roodblinden 35 in plaats van 57 in de bedoelde figuur. Weliswaar hebben beide klassen verschillende pseudo-isochromaten maar omdat deze vrij dicht bij elkaar liggen kan men de vier kleuren zo kiezen dat beide klassen eenzelfde indruk krijgen.

33. P.D. Sherman, *Colour vision in the nineteenth century* (Bristol, 1983). Bij dit overigens voortreffelijke boek moet mijns inziens de kanttekening gemaakt worden dat Sherman van een epistemologische vooronderstelling uit gaat, die niet door de historische feiten wordt ondersteund. Op vele plaatsen laat hij zich uit in termen van "false (of 'good') assumption", "incorrect (of 'correct') interpretation" enzovoort (bijvoorbeeld, p. xii, 13, 81, 90, 91, 92, 111, 114, 129, 170 en 180). Bij nauwkeurig lezen blijkt hij dat steeds te doen op basis van de inzichten in kleurverschijnselen zoals hij die in 1983 had. Echter, op een historisch moment T_1 is doorgaans niet uit te maken of een aanname, interpretatie en dergelijke op moment T_2 (voorlopig of definitief) verworpen zal dienen te worden in het licht van de stand van zaken

Het eigenlijke verhaal van de driekleurentheorie begint weliswaar in 1801, maar gaat terug op de ontdekking in 1666 door Newton van de prismatische ontleding van het zonlicht in een spectrum. Na zijn ontdekking van de zwaartekrachtwet eind 1684, begin 1685 vroeg hij zich af of het mengen van kleuren weergegeven kon worden als een zwaartepuntconstructie.³⁴ Het was immers bekend dat het resultaat van een menging des te dichter bij een oorspronkelijke kleur lag, naarmate daar meer kleurstof van werd gebruikt, terwijl in een stelsel van twee massa's het zwaartepunt het dichtst bij de zwaarste massa ligt.

Bovendien nam Newton op grond van zijn prismaproeven aan dat de kleuren van het spectrum op een cirkel gedacht konden worden met in het middelpunt wit. Het punt waar de spectrale uiteinden, rood en violet, bij elkaar komen, noemde hij purper.

Newtons meetkundige weergave bleek in een controle met kleurpoeders op te gaan voor mengingen van twee kleuren die elkaars burens waren: geel en blauw gaven groen, rood en geel oranje, enzovoort. Het resultaat was steeds iets lichter dan de zuivere spectrale kleur. De zwaartepuntconstructie liet hem echter in de steek bij diametraal tegenover elkaar liggende kleuren, *complementaire kleuren* genaamd. Hij schrijft dat zulke mengingen in plaats van wit een zwakke "anonieme kleur" te zien gaven. Hoewel hij de term 'complementaire kleuren' handhaafde, had hij die op empirische gronden dus eigenlijk moeten herdefiniëren.

In 1801 vatte Thomas Young (1773-1829) de voortplanting van het licht op als een golfverschijnsel, wat onder meer voor interferentieverschijnselen een plausibele verklaring leek te bieden.³⁵ Een lichtgolf zou op trillingen berusten van deeltjes in een onzichtbaar, fijn medium, de zogeheten *ether*.

Zo zou rood licht zich als een lange golf voortplanten en violet licht als een korte. Verder veronderstelde Young dat er in verband met het kleurenspectrum drie basiskleuren waren: rood, geel en blauw. Deze keuze sloot nauw aan bij de praktijk van de schilders: met rood, geel, blauw en groen kunnen alle andere kleuren gemaakt worden. Maar daar groen verkregen kan worden

op dat moment. Welnu, dat geldt niet alleen voor Goethes 'blauwblindheid' van 1798, voor Brewsters zienswijze van 1834 of voor die van Helmholtz in 1852, maar zal ook gelden voor Shermans optiek op enig moment na 1983.

34. Wellicht ten overvloede, maar het is vrij onwaarschijnlijk dat Newton zijn zwaartekrachtwet in 1666, het zogenaamde *annus mirabilis*, heeft ontdekt. Wat eind 1684, begin 1685 betreft: zie I.B. Cohen, *The Newtonian revolution* (Cambridge, 1980); noot 5 (Vervaeet, *Strukturalistische verkenningen*) 65v en 103-124; E. Vervaeet, "Newtons Principia", *Zenit* 4, 5 en 6 (1987). Newton zet zijn zwaartepuntsconstructie uiteen in *Opticks* (London, 1704), Book One, II, Prop. VI.

35. T. Young, "On the theory of light and colors", *Philosophical Transactions* 92 (1802) 20-71.

door geel en blauw te mengen, hield Young het op drie in plaats van vier basiskleuren.

Al in 1802 zou Young rood, geel en blauw vervangen door een ander drietal. Dit naar aanleiding van de ontdekking door William Wollaston (1766-1828) van donkere strepen in het zonnespectrum.³⁶ Die deden Wollaston aannemen dat rood, geelachtig groen, blauw en violet de vier basiskleuren waren. Young deelde die opvatting, maar liet uit Wollastons viertal blauw vallen. Geelachtig groen en violet gaven immers samen blauw, terwijl met het resterende drietal het gehele spectrum kon worden gereproduceerd. Ook aan de eis dat de drie nieuwe basiskleuren samen "het verschijnen van volkomen witheid" zouden opleveren, bleek voldaan te zijn. Tot slot verving Young geelachtig groen door zuiver groen, zodat hij rood, groen en violet overhield.³⁷

De enige keer dat Young over kleurenblindheid schreef, was in 1807. Vanuit zijn driekleurentheorie verklaarde hij haar als een onvermogen om rood te zien, want hij nam aan "dat de zenuwvezels van het netvlies, die op de waarneming van rood zijn afgestemd, afwezig of verlamd zijn."³⁸

Het zou tot 1852 duren voor Youngs driekleurentheorie een vervolg kreeg. Natuurkundigen kenden haar, maar aanvaardden haar niet omdat ze met een aantal aspecten ervan niet uit de voeten konden. Eén daarvan was de opvatting dat spectraal geel een mengsel was van spectraal rood en groen, terwijl rode en groene kleurpoeders een donkere, onduidelijke kleur gaven, in elk geval geen geel. Weliswaar zag men dat er geel ontstond als men spectraal rood en groen mengde, maar dat liet nog vele wegen open. Bijvoorbeeld, nog in 1849 zag de Schotse natuurkundige Forbes in "geel uit rood en groen" juist een reden om groen te blijven zien als een samenstelsel van geel en blauw. Hij redeneerde: "Al het blauw en een deel van geel [beide uit spectraal groen, naar Forbes meende, EV] combineren met rood om een volkomen wit te geven, dat dan het overblijvende deel van geel doet verbleken."³⁹

Bij de kwestie geel haakte ook David Brewster (1781-1868) aan in 1823.⁴⁰ In absorptiefilters zag hij een instrument om Youngs stelling over geel te

36. W.H. Wollaston, "A method of examining refractive and dispersive powers, by prismatic reflection", *Philosophical Transactions* 92 (1802) 365-380.

37. T. Young, *A course of lectures on natural philosophy and the mechanical arts* (London, 1807) plaat 39, fig. 427 en vol. 1, 437-441.

38. T. Young, *A course of lectures on natural philosophy and the mechanical arts* (London, 1807), vol. 2, 315v.

39. J.D. Forbes, "Hints towards a classification of colours", *London, Edinburgh and Dublin philosophical magazine and journal of science* 34 (1849) 161-178.

40. D. Brewster, "On a new analysis of solar light, indicating three primary colours, forming coincident spectra of equal length", *Edinburgh's journal of science* 5 (1831); herdruk in *Transactions of the royal society of Edinburgh* 12 (1834) 123-136.

onderzoeken. Hij redeneerde: als spectraal geel inderdaad uit rood en groen is opgebouwd, dan moet het zonnenspectrum op zijn blauw-violette uiteinde na geheel verdwijnen, indien men het door een rood en een groen filter tegelijk bekijkt. Tot zijn verwondering verdwenen wel het rood en het groen, maar niet het geel. Integendeel, het geel bestreek ook het gebied waar eerst rood en groen waren! Ter verklaring hiervan nam Brewster aan dat het zonnenspectrum is samengesteld uit drie even lange, onafhankelijke spectra. Deze enkelvoudige spectra zouden elk een eigen kleur en intensiteitsverdeling hebben: het rode spectrum zou zijn maximum in het rode deel van het zonnenspectrum hebben, het gele in het gele deel en het blauwe in het blauwe deel. Welnu, zo besloot hij, het rood-filter heeft het rode spectrum geheel weggehaald en het groen-filter een deel van het blauwe spectrum (dit laatste vanuit de gedachte dat groen een mengsel is van geel en blauw).

Brewsters theorie ontmoette veel weerstand. Zo vond men het vreemd dat verschillende kleuren eenzelfde breking zouden hebben, terwijl ze in Newtons prismaproeven juist gekenmerkt leken te zijn door verschillende brekingen. Eén van de tactieken was te bestrijden dat Brewster wit licht had gezien. Als zeer bekwaam experimentator wist Brewster deze aanvallen af te slaan, zodat zijn kleurentheorie tussen 1831 en 1852 het lichtdebat heeft beheerst.

De Duitse natuurkundige en fysioloog Hermann Helmholtz (1821-1894) wist Brewsters theorie definitief van haar troon te stoten. In 1852 publiceerde hij twee belangrijke artikelen. In het ene artikel⁴¹ gaf hij zijn nauwgezette replicaties van Brewsters belangrijkste proeven weer. Daarna toonde hij aan dat 'Brewsters wit' strooilicht was. Eén van de strooibronnen was volgens Helmholtz het oog van de onderzoeker. Met name de weerkaatsing tussen het netvlies en het hoornvlies bleek van belang voor het zien van wit licht in Brewsters proeven. Niet alleen wit strooilicht zou in het spel geweest zijn, maar ook gekleurd licht. Om dat laatste te kunnen begrijpen wenden we ons tot Helmholtz' tweede artikel van 1852.⁴²

Men had steeds aangenomen dat het mengen van spectrale kleuren gelijk was aan dat van kleurstoffen. Op grond daarvan zou volgens de overgrote meerderheid van de natuurkundigen geel geen samengestelde kleur zijn (zeker niet van rood en groen) en groen wel (namelijk van geel en blauw). Helmholtz pakte de zaak systematisch aan en zag dat spectraal geel en blauw inderdaad wit gaven (en geen groen) en spectraal rood en groen geel. Hij stond dus voor de vraag: hoe kunnen gele en blauwe *kleurstoffen* samen een *groene* kleurindruk geven als gele en blauwe *spectrale kleuren* in een *witte* resulteren? Hij volgde in gedachte de weg van zonlicht dat via een

41. H. Helmholtz, "Über Herrn D. Brewster's neue Analyse des Sonnenlichts", *Annalen der Physik und Chemie* 86 (1852) 501-523.

42. H. Helmholtz, "Über die Theorie der zusammengesetzten Farben", *Annalen der Physik und Chemie* 87 (1852) 45-66.

mengsel van gele en blauwe kristallen op iemands netvlies valt, en onderscheidde twee gevallen. (i) Voor zover de kristallen het invallende licht reflecteren, blijft het witte licht wit en valt er wit licht in het oog. (ii) Voor zover het licht in de kristallen binnendringt, wordt een deel van het witte licht geabsorbeerd bij het afwisselend passeren van gele en blauwe kristallen. "Blauwe lichamen plegen groen, blauw en violet licht in merkbare hoeveelheden door te laten, gele daarentegen rood, geel en groen licht. Door beide gaat dus tegelijk slechts groen en uit de diepte van het mengsel kan dus slechts groen licht terugkeren." Vandaar dat Helmholtz het samenvoegen van kleurstoffen *subtractieve menging* noemde en dat van spectrale kleuren *additieve menging*.

De Duitse wiskundige en taalwetenschapper Hermann Grassmann (1809-1877), die de meetkunde in zijn *uitbreidingsleer* van 1843 naar meer dan drie dimensies had gegeneraliseerd, bouwde op Newtons zwaartepuntconstructie voort: "Voor geel is de kleur waarmee wit licht ontstaat, indigoblaauw, een resultaat dat geenszins sterk afwijkt van Newtons theorie der kleurmenging."⁴³ Bovendien had Helmholtz gevonden dat rood met groen in vaalgeel, maar met hemelsblauw in witachtig violet resulteerde. Omdat vaalgeel en witachtig violet naar wit neigden, verklaarde Grassmann deze stand van zaken door op Newtons kleurencirkel zo te schuiven, dat de niet-witte mengresultaten enigszins naast het middelpunt vallen. Grassmanns kleurencirkel voorspelde dus vele nieuwe paren complementaire spectrale kleuren. Hij trok dat na voor vier combinaties en het resultaat was steeds zoals voorspeld: wit.

Zowel voor spectrale als voor niet-spectrale kleuren nam Grassmann vanuit zijn uitbreidingsleer aan dat ze voorgesteld konden worden als vectoren, met het beginpunt in het voor wit staande middelpunt van een cirkel en met het eindpunt op respectievelijk binnen de omtrek. Het mengen van twee kleuren zou dan weergegeven kunnen worden als een optelling van twee vectoren, die vermenigvuldigd werden met een gewichtsfactor voor de mengverhouding. Mengingen van hemzelf en van Helmholtz gaven empirische steun aan deze opvatting.

Helmholtz viel Grassmann goddeels bij, maar moest diens theorie bijstellen.⁴⁴ Groen tussen 492 en 564 nm gaf alleen met een *mengsel*, namelijk van extreem rood en extreem violet, wit. Daarom vermoedde Helmholtz dat dat groen in het spectrum geen complement had. Omdat de verschillende mengingen van rood en violet volgens de zwaartepuntconstructie op een

43. H. Grassmann, "Zur Theorie der Farbenmischung", *Annalen der Physik und Chemie* 89 (1853) 69-84.

44. H. Helmholtz, "Über die Zusammensetzung von Spectralfarben", *Annalen der Physik und Chemie* 94 (1855) 1-28. Helmholtz drukte de golflengte niet uit in 'nm', maar in delen van 'Parijser Zoll'.

rechte lijn liggen, diende het punt voor purper dus te worden gewijzigd in een rechte lijn tussen rood en violet. Een tweede reden om van de cirkelvorm af te wijken lag hierin dat niet alle paren complementaire kleuren even lichtsterk moesten zijn om wit te geven. Voor oranje en cyaanblauw bleek dat nagenoeg het geval, maar blauwachtig en geelachtig groen bleken aanmerkelijk lichtsterker te moeten zijn dan rood respectievelijk violet.

Helmholtz beschikte niet over een methode om lichtintensiteiten in verschillende mengingen op elkaar te normeren. Dat zou veranderen door het werk van de Schotse natuurkundige James Clerk Maxwell (1831-1879). Van Forbes had hij geleerd dat men kleurenproeven kon doen met twee draaiende schijven. Op de ene bevonden zich een witte en een zwarte strook en op de andere twee of drie stroken (bijvoorbeeld van rood, geel en blauw), terwijl beide waren verdeeld in 100 gelijke segmenten. In 1854 nam Maxwell⁴⁵ in plaats van twee schijven één schijf die hij in twee ringen verdeelde. Een van de voordelen was het voorkomen van ongelijke lichtintensiteiten vanwege schaduwen, ongelijke belichting enzovoort. Verder gebruikte Maxwell drie kleuren op de buitenring: rood, groen en — in plaats van Youngs violet — blauw. Een proefpersoon moest zeggen of de buitenring te rood, te groen of te blauw was en de binnenring te donker of te licht. Aldus stelde hij kleurvergelijkingen op die hij kon normaliseren.

Ter controle van zijn verklaring voor kleurenblindheid als een ontbreken van de 'rode *sensatie*' deed Maxwell bij twee kleurenblinden eveneens proeven met draaiende schijven. Omdat ze aangaven dat ze maar twee kleuren zagen, die ze blauw en geel noemden, vroeg hij: "Welke ring lijkt het meest blauw of geel?" en "Welke lijkt het lichtst en welke het donkerst?" Zo was donker blauwachtig groen voor kleurenblinden gelijk aan rood. Op grond van dit soort gegevens construeerde hij via de zwaartepuntconstructie het punt Z dat overeen moest komen met de kleursensatie die een kleurenblinde mist. De proefondervindelijke controle van die theoretische constructie bevestigde zijn optiek en hij concludeerde: "De nauwkeurigheid van deze resultaten (...) geeft een zeer betrouwbare basis waarop we een theorie over kleurenblindheid kunnen opbouwen, daar ze de waargenomen feiten ervan volledig tot uitdrukking brengt. Ze leveren ons ook een gegeven op voor onze theorie omtrent het ongestoorde gezichtsvermogen, namelijk het punt Z dat op de exacte aard van de kleursensatie wijst, die aan het kleurenblinde oog toegevoegd moet worden om het volkomen te maken."

Met behulp van zijn kleurendoos van 1858 en latere verbeterde versies daarvan kon Maxwell zuiver additieve proeven met spectrale kleuren

45. J.C. Maxwell, "Experiments on colour, as perceived by the eye, with remarks on colour-blindness", *Transactions of the royal society of Edinburgh* 21 (1855) 275-298.

verrichten. Zo kon hij voor 12 spectrale kleuren bepalen welke mengingen van groen en blauw bij kleurenblinden dezelfde kleurindruk gaven.

Synthese

Onder fysici won de driekleurentheorie door toedoen van Helmholtz en Maxwell snel veld, ook als verklarend kader voor kleurenblindheid. In zijn interpretatie daarvoor nam Helmholtz aan dat rood, groen en violet de drie basiskleuren waren. Al naar gelang de sensatie die niet werd opgemerkt, onderscheidde hij roodblindheid, groenblindheid en violetblindheid.⁴⁶

Psychologen en fysiologen bleven echter met een aantal problemen zitten. Zo was één van de aanleidingen voor Hering om zijn theorie van de tegenkleuren te formuleren, dat de driekleurentheorie, die in de jaren zestig van de vorige eeuw dominant was, het zien van wit niet goed verklaarde: menging van rood, groen en violet gaf in de praktijk nooit wit, meestal een lichte kleur (rood, groen of violet) of grijs. Een andere aanleiding was dat geel een probleem bleef: fysiologisch kon men niet inzien dat spectraal geel een mengsel van rood en groen zou zijn. Iets dergelijks gold voor blauw: volgens de driekleurentheorie zou spectraal blauw ontstaan uit het mengen van groen en violet. Wat kleurenblindheid betreft: Helmholtz' violetblindheid werd gedekt door Herings blauw-geel-blindheid, terwijl Helmholtz' rood- en groenblindheid samen opgingen in Herings rood-groen-blindheid.

Pas nadat in de jaren twintig van de huidige eeuw nieuwe onderzoeksmethoden binnen handbereik waren gekomen liet men de theorie van de tegenkleuren als exclusief verklarend kader voor het kleurenzien geleidelijk aan los. Stilling zelf is er echter tot aan zijn dood aanhanger van gebleven. Zo schreef hij nog in 1910: "Het principe van de hypothese van Young is vals, omdat het de grondwetten van de kennisleer weerspreekt" en "De theorie van Helmholtz gooit de problemen door elkaar."⁴⁷

Als eerder gezegd: de huidige interpretatie van kleurenblindheid en van pseudo-isochromatische proeven berust op de driekleurentheorie en de theorie van de tegenkleuren. Dat wil zeggen, in overeenstemming met de driekleurentheorie bevinden zich in het netvlies drie soorten cellen die gevoelig zijn voor een deel van het spectrum. De eerste soort is maximaal gevoelig voor rood, de tweede voor groen en de derde voor blauw. Alle drie zijn ze via tussenstations verbonden met de visuele cortex. Daar zijn vier soorten kleurgevoelige zenuwcellen, alle met een rond receptief veld bestaand

46. H. Helmholtz, "Über Farbenblindheit", *Verhandlungen des naturhistorisch-medizinischen Vereins zu Heidelberg* 2 (1859) 1-3. Rood-, groen- en violetblindheid worden tegenwoordig aangeduid als protanopie, deuteranopie respectievelijk tritanopie. In plaats van 'violetblindheid' komt men ook wel eens 'blauwblindheid' tegen; zie echter noot 12.

47. Zie noot 31 (Sherman, *Colour vision*) 421 respectievelijk 426.

uit een centrum en een rand, de zogeheten *dubbel-opponente cellen*. Bij de eerste soort wordt de cel geëxciteerd als rood licht in het centrum valt en geïnhibeerd als er groen licht op valt, terwijl het omgekeerde geldt voor de rand. Bij de tweede soort zijn de rollen van rood en groen verwisseld. De derde en vierde soort cellen reageren op soortgelijke wijze op geel en blauw. Met andere woorden, wat in de cortex gebeurt, lijkt op de beschrijving volgens de theorie van de tegenkleuren.⁴⁸

Deze synthese gaat terug op de Utrechtse hoogleraar in de fysiologie en directeur van het Utrechtse Ooglijdersgasthuis Franciscus Donders (1818-1889). Donders redeneerde als volgt. Ondanks alle verschillen gaan zowel de theorie van de tegenkleuren als de driekleurentheorie uit van een 1-op-1-correspondentie tussen het netvlies en de psyche of de visuele waarneming.⁴⁹ Achteraf bekeken kunnen we stellen dat in die 1-op-1-correspondentie één van de grootste struikelblokken voor het kleuronderzoek lag om voortgang te maken. Immers, volgens beide scholen zou het netvlies het licht analyseren (in vier respectievelijk drie basiskleuren), terwijl die analyse ongewijzigd zou worden waargenomen. We zien dan ook dat lang niet alle auteurs zich realiseren dat 'kleuren' en 'kleurenzien' verschillende onderwerpen zijn. Maar zelfs als men zich dat realiseerde (en ook dat gold voor beide scholen; zie bijvoorbeeld zowel Goethe als Young), dan nog postuleerden de dialectici de geldigheid van hun beweringen, die strikt genomen slechts op het kleurenzien betrekking hadden, voor kleur als fysisch verschijnsel, terwijl de aanhangers van de driekleurentheorie het kleurenzien trachten te reduceren tot natuurkundige wetten.

Welnu, in 1881 brak Donders met die 1-op-1-correspondentie tussen netvlies en waarneming (en dus ook met die tussen kleur als fysisch verschijnsel en kleur als psychofysiologisch verschijnsel) door voor beide theorieën een beperkt geldigheidsgebied aan te nemen: de driekleurentheorie op retinaal nivo en Herings theorie op dat van de waarneming. Het netvlies en de visuele waarneming zouden door één of meer tussenstations in plaats van 1-op-1 met elkaar verbonden zijn, terwijl de gegevens omgewerkt zouden worden.⁵⁰

48. Het ziet er naar uit dat hier een kleine correctie op aangebracht moet worden. Waarschijnlijk zijn geel en blauw elkaars complementaire kleuren, maar rood en groen niet helemaal: bij het mengen van de spectrale kleuren rood en groen ontstaat niet wit, maar geel. Rood en groen zijn dus differentiaties van geel zodat het rood-groen-systeem is op te vatten als een subsysteem van het blauw-geel-systeem. Aldus analyseert de visuele cortex het licht eerst naar wit en zwart, dan binnen wit naar blauw en geel en tot slot binnen geel naar groen en rood (mondelinge mededeling van prof. dr. R.A. Crone).

49. Toen merkte men als het centrum van de visuele waarneming de psyche aan, nu de visuele cortex.

50. F.C. Donders, "Les systèmes chromatiques", *Archives Néerlandaises des sciences exactes et naturelles* 16 (1881) 150-214, m.n. 166v.

Omdat hij die geldigheidsgebieden zones noemde, is zijn theorie als de *zonetheorie* de geschiedenis in gegaan.

In feite greep Donders bij de twistappel geel aan en stelde hij vervolgens de 1-op-1-correspondentie tussen netvlies en waarneming ter discussie: "Uit het samengaan van twee kleuren kan een derde kleur voortvloeien in welke geen van beide zichtbaar is: bijvoorbeeld geel uit het samengaan van rood en groen; uit twee processen moet dus een derde proces *sui generis* voortkomen."

Met Donders' zonetheorie en de huidige interpretatie van kleurenblindheid zijn pseudo-isochromatische kleurenblindheidsplaten één van de talrijke voorbeelden van instrumenten die in het kader van theorie X zijn ontworpen (i.c. de theorie van de tegenkleuren), maar later in het kader van theorie Y zijn herduid (i.c. de zonetheorie).⁵¹ Dat theorie X in herinterpretatieve zin in theorie Y is opgegaan, verandert daar niets aan.

51. Het gestelde geldt niet slechts voor instrumenten, maar ook voor feiten, wetten en theorieën. Van elk een voorbeeld. a. Kepler herinterpreteerde Brahes waarnemingen van de standen van de planeten, die waren verkregen binnen Brahes half-geo- en half-heliocentrische model, binnen Copernicus' heliocentrische model. b. Newton herinterpreteerde Keplers drie wetten binnen zijn zwaartekrachttheorie en mechanica. c. Precies zoals de theorie van de tegenkleuren en de driekleurentheorie opgingen in Donders' zonetheorie, zo zijn ook Maxwells elektrodynamica en Hamiltons versie van Newtons mechanica opgegaan in Einsteins speciale relativiteitstheorie.

SUMMARY

The first tests for colourblindness

Usually Goethe or John Dalton is supposed to have discovered colourblindness. However, the English oculist Joseph Huddart (1776) was the discoverer of this phenomenon. The first physiological explanation of it does come from Goethe. From 1798 onwards he believed that the colourblind missed the faculty to perceive blue. He assumed that green was made up of blue and yellow, with orange being an intensified kind of yellow: whoever wasn't able to see blue, should see green and orange as the same colour.

Goethe's colour theory (1810) found its successor in Hering's opponents' theory of colours (1874). In this theory red and green are supposed to be each other's opponent colour, just like blue and yellow. Correspondingly there would be two visual substances: one should give a red sensation if the red-green substance is subject to a katabolic change and a green one if it is subject to an anabolic change, and one should see yellow when katabolism preponderates in the blue-yellow substance and blue when anabolism preponderates in it. So Hering differentiated two kinds of partial colourblindness: red-green blindness (or confusion) when the red-green substance was missing and blue-yellow blindness (or confusion) when the blue-yellow substance was missing.

The first and for practical purposes still most important pseudo-isochromatic test of colourblindness (1883) was based on Hering's theory. (Pseudo-isochromatic means: in

appearance (but for the colourblind in reality) having the same colour.) It was constructed by the German oculist Jakob Stilling (1842-1915).

A colour theory that competed for a long time with Hering's theory, was the three colour theory of Young (1802) and Helmholtz (1855). It explained colourblindness as an absence of one of the three colour sensitive cells in the retina, the so-called cones. According to this theory there are three kinds of colourblindness.

Nowadays we explain colour vision with a synthesis of the three colour theory and the opponent' theory. It is rooted in the zonal theory of the Dutch ophthalmologist Franciscus Donders (1818-1889). The former theory is supposed to be valid only for the retina and the latter only for the visual cortex. Like the three colour theory it explains most forms of colourblindness as an absence of one of the three cones, so that the corresponding double opponent cells in the visual cortex lose their discriminatory function.