

3. KLEURENLEER

3.1 Inleiding

De verhouding van de mens als individu tot de wereld als geheel vormt een belangrijk thema voor de twaalfde klas. Een voorbeeld van zo'n verhouding is de wetenschapper, die zich op een bepaalde wijze verhoudt tot een gebied van fenomenen, zoals dat van de kleurverschijnselen, en vanuit deze verhouding tot een eigen visie op deze fenomenen komt. Twee belangrijke mensen die een omvattende kleurenleer ontwikkelden waren Sir Isaac Newton (1642-1727) en Johann Wolfgang von Goethe (1749-1832). Newtons visie op kleur, die in latere jaren door andere wetenschappers verder werd ontwikkeld, is een duidelijk voorbeeld van een reductionistische beschouwingswijze, terwijl Goethe's ideeën over kleur het resultaat zijn van een fenomenologische aanpak. Juist het verschillende karakter van hun inzichten dat hier uit voortvloeide maakt deze kleurenleren geschikt voor behandeling in de twaalfde klas, omdat voor leerlingen zichtbaar wordt hoe mensen zich op geheel verschillende wijze tot de natuur kunnen verhouden en hoe zij deze verhouding consequent kunnen uitwerken.

De wijze waarop men de leerlingen met het verschil van deze twee kleurenleren kan laten kennismaken wordt in paragraaf 3.5 besproken. In paragraaf 3.2 t/m 3.4 wordt, in het verlengde van Goethe's werk, kleur behandeld als het resultaat van wisselwerking tussen licht en duisternis.

3.2 Hemelkleuren

3.2.1 Het begin van Goethe's kleuronderzoek

Voor Goethe vormde het kijken door een prisma naar een raamkozijn het begin van zijn kleurenstudie. Middels Newton's Optics had hij kennism gemaakt met diens ideeën over kleur, die hij heel overtuigend vond. Wel had hij de behoefte om enige proeven ook zelf uit te voeren en had daartoe een prisma van een vriend geleend. Door drukke werkzaamheden opgehouden kwam hier niets van totdat een dienaar het prisma kwam halen en Goethe er nog gauw een blik door wierp. Hij bekeek eerst een witte muur, die hij tot zijn verbazing niet gekleurd maar wit zag. Alleen daar waar zich een spijker in de muur bevond was het beeld gekleurd. Vervolgens wendde Goethe zich naar het venster. Nu zag hij wel kleur, namelijk op alle verticale licht/duister-randen. Dit bracht hem ertoe het

prisma te houden om al Newton's proeven na te doen. Goethe had de directe intuïtie dat Newtons kleurenleer onjuist was. In plaats van het uitgangspunt dat wit licht een optelsom van alle kleuren was, zoals Newton dat zag, ontstond bij Goethe het vermoeden dat licht én duisternis beide verantwoordelijk zijn voor het ontstaan van kleur.

Vervolgens begaf Goethe zich op een zoektocht door alle kleurfenomenen die hem bekend waren. Dit bracht hem bij de hemelkleuren, die hem een zuivere uitdrukking van het meest elementaire kleurfenomeen (het oerfenomeen) leken. Een waarnemer die een lichtbron door een troebel medium, zoals een rookkolom, bekijkt, ziet deze lichtbron geel of rood gekleurd. Goethe noemde de werking van het troebele medium hierbij 'verduisterend'; hij sprak van een situatie van duister vóór licht (vanuit de waarnemer gezien) en zag het gele of rode licht als *verduisterd licht*. Een waarnemer die dezelfde rookkolom vanuit een ander standpunt bekijkt, namelijk tegen een duistere achtergrond, ziet deze blauw gekleurd. Omdat de rook verlicht wordt sprak Goethe van licht vóór een duistere achtergrond, ofwel van *verlichte duisternis*. In het navolgende zullen we, in het verlengde van deze zienswijze, de fenomenen van de hemelkleuren nader beschouwen.

3.2.2 Troebele media

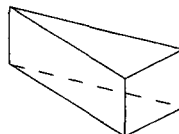
Troebele media kunnen van allerlei aard zijn. Globaal kan men ze indelen naar de drie aggregatietoestanden:

<i>vast</i>	bijvoorbeeld melkglas
<i>vloeibaar</i>	bijvoorbeeld water met was o.i.d.
<i>gasvormig</i>	bijvoorbeeld rook, de atmosfeer, een vlam

- *Vast*. Een stuk melkglas is zeer geschikt om Goethe's oerfenomeen te demonstreren. Men houdt het eenvoudig voor het raam of voor het raamkozijn en ziet respectievelijk rood en blauw.
- *Vloeibaar*. Een bekende manier om water troebel te maken vormt het toevoegen van een beetje melk of zeep. In beide gevallen zijn de kleuren van zowel de rode als de blauwe kant niet helder. Er zijn twee alternatieven die beter uitpakken. Het toevoegen van vloeibare boenwas of van zeepspiritus. Zeepspiritus geeft aan de blauwe kant de meest heldere kleuren, maar heeft als nadeel dat de oplossing colloïdaal wordt, zodat de troebelheid enige tijd toeneemt. Men kan dus de oplossing van tevoren maken en de uiteindelijk gewenste troebelheid van tevoren inschatten. Zo'n oplossing kan men gebruiken voor vaste opstellingen zoals de

'toverstaf' van Ruud van Renesse: een lange glazen buis, diameter ongeveer 4 cm, die aan beide zijden met een vastgekit glazen plaatje is afgesloten. Als men deze toverstaf voor een diaprojector plaatst is er over de lengte van de buis een kleurverloop te zien van wit, via geel naar oranje en tenslotte rood.

Voor sommige proeven is het nodig de troebelheid van de vloeistof te kunnen variëren. Hiervoor kan men een cuvet gebruiken met als grondvlak een langgerekte gelijkbenige driehoek. Houdt men een dergelijk cuvet gevuld met troebel water tegen het licht, dan ziet men



van smal naar breed een kleurverloop wit-geel-oranje-rood. Houdt men het cuvet voor een raamkozijn, dan ziet men van smal naar breed een verloop violet-blauw-lichtblauw. Men kan zo'n cuvet ook door een dichtbij geplaatste diaprojector beschijnen. Van boven af gezien is er om de lichtbundel in het water licht- of donkerblauw te zien. Kijkt men in zo'n geval tegen de lichtbundel in, dan ziet men een gele respectievelijk rood gekleurde lichtbron.

- *Gasvormig*. Behalve de atmosfeer als troebel medium, met de hemelkleuren die hierna uitgebreid besproken zullen worden, rekenen we rook tot de lucht-troebele media. Bekend is dat sigarettenrook blauw kleurt. Nauwkeurig waarnemen maakt duidelijk, dat dit het geval is als we verlichte rook tegen een donkere achtergrond zien. De rookkolom van een fabriek in de bergen, die tijdens de avondschemering wordt gezien, kleurt tegen de licht hemel rood en tegen de donkere bergwand blauw.

Een spiritusvlam, zegt men, is blauw. Bekijkt men de vlam echter tegen een lichte achtergrond, dan is deze transparant. De troebeling is te weinig voor het ontstaan van geel of rood. Alleen tegen een wat donkerder achtergrond kleurt de vlam blauw.

3.2.3 De op- of ondergaande zon

De hier volgende beschouwing kan men geheel in samenspraak met de leerlingen tot stand brengen. Het stellen van de juiste vragen is veelal voldoende. Men begint ermee de leerlingen de opdracht te geven een zonsondergang nauwgezet te bekijken. Als dit niet haalbaar is, kan men ook een leerling vragen zo'n zonsondergang uit de herinnering te beschrijven en dit laten corrigeren door anderen.

Naarmate de zon bij open hemel lager aan de horizon staat, kleurt hij geel, oranje of rood. Dit is niet alleen voor een waarnemer het geval die naar de zon kijkt, het zonlicht zelf zal een witte achtergrond ook geel,

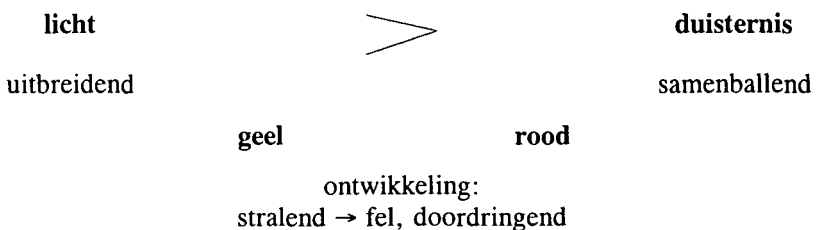
oranje of rood kleuren. Naarmate de zon zakt dringt het zonlicht door steeds dichtere, vaak ook vochtigere lagen van de atmosfeer. Het troebele karakter van het medium neemt daarbij dus toe. Het eerste wat opvalt, is dat het gekleurde licht als resultaat hiervan verduisterd is. De verduisterende werking gaat uit van het troebele medium. Het tweede aspect wat de aandacht verdient, is het gegeven dat de zon steeds meer contour krijgt naarmate hij lager aan de horizon staat. Dit lijkt volkomen duidelijk, immers de gele zon is lichter en dus stralender dan de rode zon. Er is echter meer.

Dit blijkt als we de leerlingen een schilderij voorhouden waarop meerdere gele kleurvlakken temidden van anders gekleurde vlakken te vinden zijn. We bemerken dan dat deze gele vlakken een geheel vormen. Beschouwt men dit nader, dan blijkt dat een heel bepaalde eigenschap van het geel hieraan ten grondslag te ligt, namelijk het gegeven dat het geel over de rand van het gele kleurvlak heen straalt. Dit stralende karakter van het geel verbindt de verschillende gele kleurvlakken. Het geel heeft nog in sterke mate het stralende karakter van het ongekleurde licht. Maar juist de eerste mate van verdichting, die het licht in het ontstaan van de kleur geel heeft ondergaan, maakt dit stralende karakter ervaarbaar, terwijl de stralende tendens van het ongekleurde licht zo sterk is dat wij die niet kunnen bevatten. Zoals het licht zichtbaar wordt aan de duisternis, zo wordt in het geel het stralende karakter van het licht aan de samenballende werking van de duisternis tot verschijning gebracht.

We willen de waarneming van dit stralende karakter, die in eerste instantie gevoelsmatig en daardoor subjectief lijkt, als objectief beschouwen, dat wil zeggen als tot het wezen van het geel behorend. Heel duidelijk komt men dit stralende karakter tegen als het geel een sterke contour heeft en grenst aan zwart, zoals bij de wesp. Het stralende geel pal naast het zuigende, absorberende zwart geeft een knallend effect, wat de wesp zijn afschrikwekkende uiterlijk geeft.

Heeft het getoonde schilderij ook een aantal rode kleurvlakken, dan merken we dat elk rood vlak op zichzelf staat. Rood straalt ook niet over de grens van het rode vlak heen. Men komt het meest aan het karakter van rood tegemoet door het contour te geven. In reclames worden teksten bijvoorbeeld vaak met een enkele rode lijn onderstreept. In zo'n rode lijn wordt het gecontoureerde ten top gevoerd, wat geheel overeenstemt met het felle, doordringende karakter van het rood, dat de toeschouwer de indruk geeft dat het recht op hem af komt. Eventueel kan men eenvoudige schilder- of kleuroefeningen met de leerlingen doen, waarbij men gele en rode kleurvlakken beurtelings uitstralend of gecontoureerd uitvoert. Al doende wordt dan de hierboven gegeven karakterisering voor de leerlingen ervaarbaar.

Samenvattend kan men de verduisterende werking die van het troebele medium uitgaat op het licht omschrijven als verdichtend, samenballend. Licht, dat van nature een uitbreidend karakter heeft, kan dat nog tonen in de stralend gele, maar niet meer in de gecontoureerde rode zon. Het rood is te beschouwen als het resultaat van de maximale verdichting van het licht. Het krachtige karakter van het rood kan ons op de gedachte brengen, dat onder invloed van de samenballende werking van de duisternis het licht een metamorfose ondergaat, waarbij de extensieve kwaliteit in een intensieve overgaat. Goethe noemde dit "Steigerung" bij de overgang van geel naar rood, een begrip dat wij in dit verband het best met "intensivering" kunnen vertalen.



3.2.4 De blauwe hemel

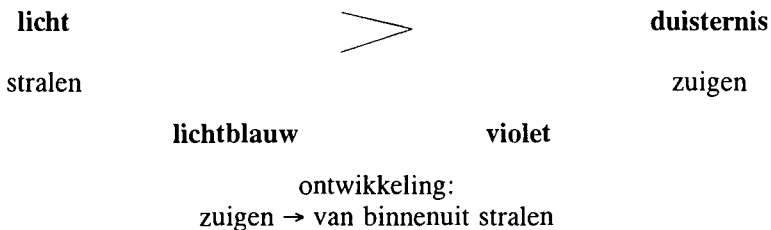
Op soortgelijke wijze als bij de ondergaande zon zullen we het blauw van de open hemel behandelen. In Nederland zien we aan de horizon een licht, wittig blauw, dat zich naar het zenit toe verdiept tot ultramarijn. In de tropen is de horizon al blauw en is het zenit diepblauw. Gaan we in de bergen omhoog bij een strak blauwe hemel, dan verdiept zich het blauw van het zenit nog verder richting violet.

Om de beschreven fenomenen van lichtblauw tot zeer diepblauw in hun samenhang te kunnen zien is het nodig meer aandacht te geven aan het aspect van de diepte van het blauw. Het wit van de horizon straalt zoals alle wit op ons toe. Gaande met onze blik van horizon naar zenit klapt dit naar-ons-toe-stralen om tot het wijken van blauw en het zuigen van diepblauw. Bergbeklimmers melden dat het zeer diepe, violetachtige blauw van hoog in de bergen zó'n zuigende indruk op iemand kan maken, dat men de neiging krijgt om zich aan de rotsen vast te houden. Het blauw tussen horizon en zenit houdt voor de blik een evenwicht in tussen stralen en zuigen. De blik rust in een verre wijdte, een gevoel van diepte is nog niet aanwezig.

Ook deze indrukken willen we niet slechts subjectief nemen. Zij vormen een aanwijzing voor de tendensen van licht en duisternis die in

het ontstaan van het blauw werkzaam zijn. Het troebele medium van de atmosfeer vertegenwoordigt voor de blikrichting van de waarnemer een verlichtende werking. Naarmate we meer naar het zenit kijken, zien we niet alleen een steeds dieper, maar ook steeds donkerder blauw. Dit kan leiden tot het inzicht dat de dieptewerking, de zuigende tendens van het blauw samenhangt met de duisternis, hier vertegenwoordigd door de ruimtelijke maar onstoffelijke kosmos. Het troebele medium wordt zelf lichtend en ondergaat een zuigende tendens, waardoor het wijkende, diepe blauw ontstaat.

Het ontstaan van het violet vraagt speciale aandacht. Violet licht doet de omgeving in een merkwaardig schijnsel oplichten. Een deken van licht schijnt de stof te omhullen, alsof deze van binnenuit straalt. Dit van binnenuit stralen is ook een kenmerk van het violette licht zélf. Dit kan men vaststellen bij het kijken door een prisma en daarbij te letten op de violette kleurband. Ook bij de overgang van blauw naar violet sprak Goethe van "Steigerung". Deze is echter van een kwalitatief andere aard dan bij de overgang van geel naar rood. Het rood ontstaat door intensivering van de verduisterende werking op het licht. Het violet ontstaat wanneer de donkere achtergrond minimaal wordt opgelicht door het licht in het troebele medium. Bij het rood werkt de atmosfeer als verduistering, verdichting. Bij het violet werkt de met licht vervulde atmosfeer zo in op de donkere achtergrond, dat er transparantie, diepte ontstaat. Door die transparantie zuigt de duisternis als het ware het licht in zich op en komt zelf, maar nu van binnenuit, tot stralen.

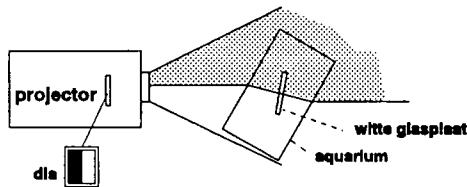


3.3 Prismatische kleur

3.3.1 Het ontstaan van prismatische kleur in samenhang met breking

Prismatische kleur is een wezenlijk gecompliceerder fenomeen in vergelijking met de hiervoor behandelde hemelkleuren. Per klas zal men moeten bekijken welke elementen men aan bod laat komen.

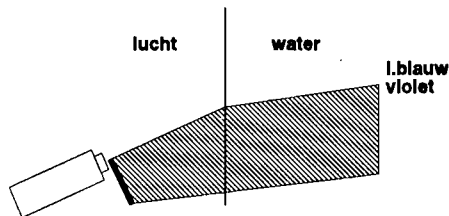
Het verschijnsel breking is in paragraaf 2.4.2 besproken. Aan de kleurverschijnselen die ermee gepaard gaan is daar toen verder geen aandacht besteed; die zijn nu aan de orde. Men kan uitgaan van de situatie, waarin een lichtbundel door een waterprisma schijnt. De lichtbundel is aan twee kanten begrensd. Het heeft echter voordelen om te beginnen met een opstelling met slechts één licht/donkergrens. Bij gebruik van een grote, niet te diepe driehoekige glazen bak als waterprisma is met een matglazen scherm vorm en kleur van de licht/donkergrens zowel in de lucht als in het water te onderzoeken. Als lichtbron gebruiken we een diaprojector; met een stuk karton creëren we de licht/donkergrens. Zie voor de opstelling onderstaande figuur.



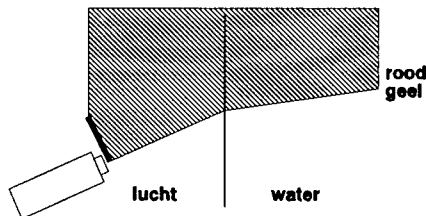
Achtereenvolgens onderzoeken we vier situaties, zie bijbehorende figuren.

1. Overgang van lucht naar water.

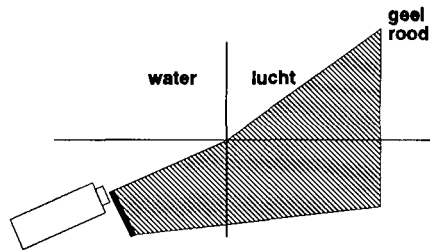
Bij de gekozen richting van de licht/donkergrens treedt een knik op zoals in de figuur. Er ontstaat een blauw/violette kleurrand met violet grenzend aan het duister.



2. Als het karton aan de andere kant van de projector gehouden wordt, is de licht/donkergrens op dezelfde manier geknikt. Er ontstaat nu echter een rood/gele kleurrand, met het rood grenzend aan het duister.

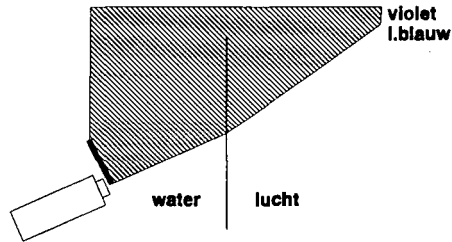


3. Overgang van water naar lucht. (Men kan dit realiseren door de licht/donkergrens loodrecht op het waterprisma te laten vallen; er treedt dan namelijk bij de overgang van lucht naar water geen breking op).



Bij de gekozen richting van de licht/donkergrens treedt nu een knik op als in de figuur hieronder. Er ontstaat een geel/rode kleurrand met het rood grenzend aan het duister.

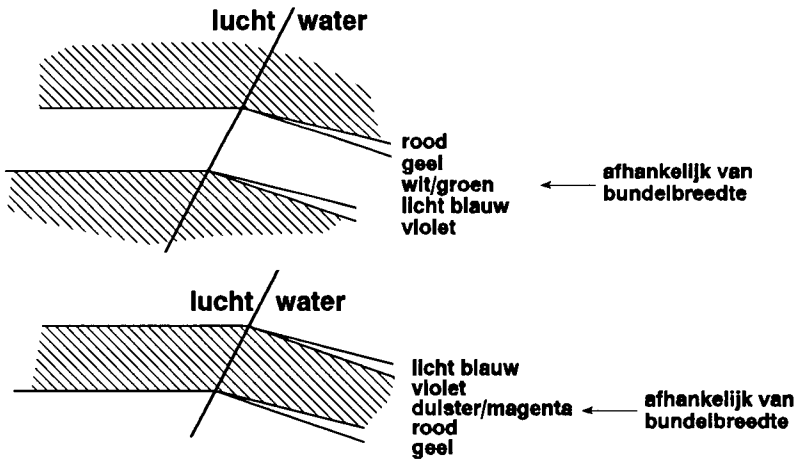
4. Als licht en duister weer verwisseld worden blijft de licht/donkergrens op dezelfde manier geknikt, maar de kleurrand is nu weer blauw/violet, met violet grenzend aan het duister.



Vervolgens kan men twee licht/donkergrenzen gecombineerd laten breken. En wel zo, dat een bundel licht zich in een duistere ruimte bevindt, of andersom. In het eerste geval ontstaat het spectrum zoals dat door Newton beschreven en verklaard werd. Als de bundel smal is, ontstaat in het midden van het spectrum de kleur groen. Als het gaat om een duistere bundel in een lichte omgeving, dan ontstaat het spectrum dat wel het "Goethe spectrum" genoemd wordt. Als de duistere bundel smal is, ontstaat in het midden de kleur magenta. Zie voor beide situaties de figuren bovenaan bladzijde 313.

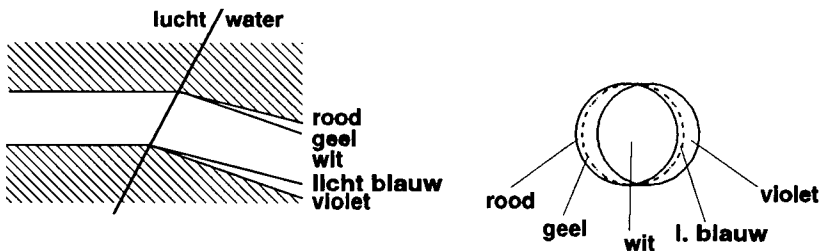
De eenvoudigste situatie waarin prismatische kleur ontstaat, blijkt te voldoen aan drie voorwaarden:

1. Er moet een overgang zijn tussen twee media van verschillende optische dichtheid.
2. Er moet een grens zijn tussen een lichtruimte en een duisternisruimte.
3. Deze grens moet schuin staan op het grensvlak tussen de beide media.

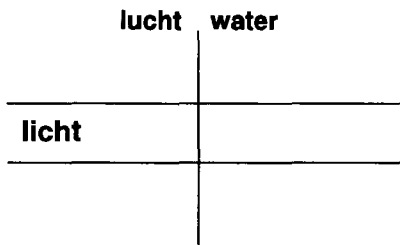


3.3.2 Optische dichtheid en duisterniswerking

We kunnen nu deze basisvoorwaarden laten variëren en de effecten daarvan onderzoeken. De meeste invloed blijkt de hoek te hebben die de licht/donkergrens heeft ten opzichte van het grensvlak tussen de beide media. Hoe schuiner het licht invalt hoe breder de kleurbanden zijn. De hoek waaronder het licht invalt beïnvloedt het verschijnsel echter ook nog in andere aspecten. We willen daarom het geheel van deze effecten nader bekijken. We kiezen daartoe een evenwijdige lichtbundel met een cirkelvormige doorsnede en laten deze bundel de overgang van lucht naar water onder verschillende hoeken passeren.



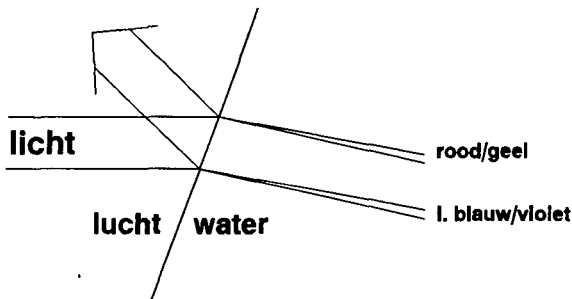
Doet men de proef bij loodrechte inval op het grensvlak dan treedt geen breking op, alleen heffing en minimale reflectie.



Doorgaande bundel
 1. geen afbuiging
 2. geen kleurranden en divergentie van de bundel
 3. maximale intensiteit

Gereflecteerde bundel
 minimale intensiteit

Naarmate de bundel onder een schuinere hoek invalt, treedt er toenemende reflectie op aan de grens tussen de media en heeft de doorgaande bundel een afnemende intensiteit, een toenemende breking de stof in, een toenemende breedte en steeds bredere kleurranden.



Doorgaande bundel
 1. toenemende afbuiging de stof in
 2. toenemende divergentie en breedte kleurranden
 3. afnemende intensiteit

Gereflecteerde bundel
 toenemende intensiteit

Deze effecten bereiken een maximum bij een langs het wateroppervlak scherende bundel.

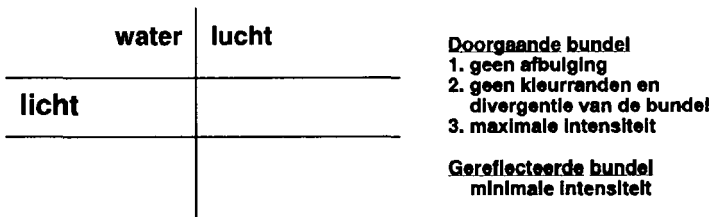
Beschouwen we deze verschijnselen in samenhang, dan worden we bij de overgang van een optisch dunner naar een optisch dichtere medium de volgende twee tendensen gewaar:

1. Het optisch dichtere medium "zuigt" de lichtbundel in zich op. Tot deze uitdrukking, die aan de wereld van de gassen is ontleend, kan men komen, wanneer men zich herhaaldelijk de lichtbreking voor ogen stelt, beweeglijk variërend tussen minimale breking (bij loodrechte inval) en maximale (bij scherende inval). Men krijgt dan de indruk dat het licht de stof in getrokken wordt. Men zou dit de duisterniswerking van het optisch dichtere medium kunnen noemen. De richting van deze werking is loodrecht op het grensvlak tussen de twee media, de dichtere stof in. Bij deze "inzuiging" van de lichtbundel treedt differentiatie op aan de blauwe en de rode kant van de bundel.

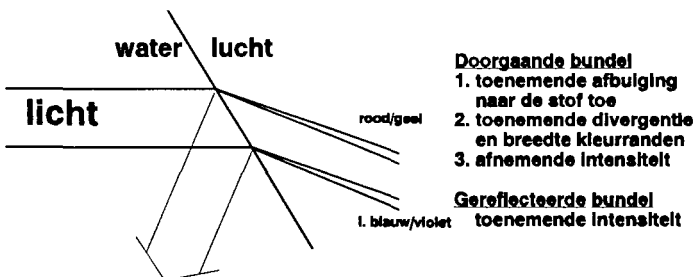
2. Het optisch dichtere medium "sluit" zich voor de lichtbundel. Tot deze indruk komt men, wanneer men in de beweeglijke voorstelling de reflectie van de lichtbundel opneemt, die steeds sterker wordt bij schuinere inval van het licht op de grens tussen de media. Deze ontoegankelijkheid voor het licht is geen exclusieve eigenschap van doorzichtige stoffen: ook een ondoorzichtige stof reflecteert het licht sterker naarmate dit schuinere het oppervlak treft.

Deze twee tendensen, inzuigen en weerkaatsen, werken hier tegengesteld. De stof wordt voor het licht minder toegankelijk naarmate het schuinere invalt. Het deel van het licht dat de optisch dichtere stof echter wél binnentreedt zal des te sterker de stof ingezogen worden.

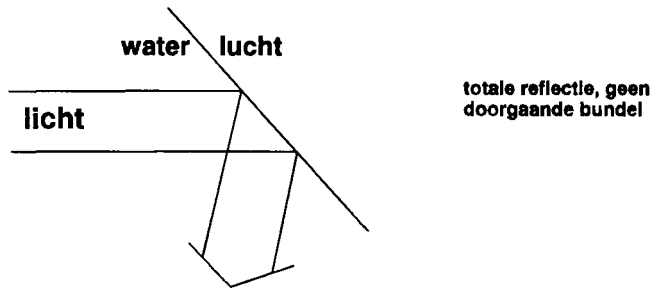
Op dezelfde wijze als in het voorgaande willen we ook de verschijnselen bij de overgang van een optisch dichtere naar een optisch dunner medium beschouwen. Laten we een lichtbundel loodrecht op deze overgang invallen, dan vindt er ook hier geen breking plaats en vertoont de doorgaande bundel geen kleurranden. Wel treedt er weer minimale reflectie op.



Naarmate de lichtbundel schuinere invalt is de breking sterker, waarbij het licht breekt naar het grensvlak van de media toe. Tegelijkertijd neemt de intensiteit van de doorgaande bundel af.



Deze bereikt een minimale waarde als de doorgaande bundel maximaal gebroken is en het dichtere medium scherend langs de grensovergang verlaat. Dan is ook de intensiteit van de gereflecteerde bundel maximaal. De betreffende invalshoek wordt grenshoek genoemd. Bij een nog schuinere inval van de lichtbundel blijft de reflectie maximaal en is er geen brekende lichtbundel meer waarneembaar. We spreken dan van totale reflectie.



Wanneer men nu bij deze overgang van optisch dicht naar optisch dunner medium de richting van het invallende licht weer in de voorstelling varieert tussen de loodrechte stand en de grenshoek, bemerken we aan verschijnsel van de totale reflectie een tendens die beschreven kan worden als een willen vasthouden van het licht door het optisch dichtere medium. Vanaf de grenshoek blijft het licht in het dichtere medium gevangen. Ook het feit dat het licht breekt naar het grensvlak tussen de media toe wijst op deze tendens. We kunnen dit als volgt samenvatten: bij loodrechte hoek van inval kan het dichtere medium het licht nog nauwelijks vasthouden. Wordt de hoek van inval schuin, dan is het dichtere medium hier al meer toe in staat, "zuigt" het licht naar zich toe. Voorbij de grenshoek is dit inzuigen zo sterk, dat het dichtere medium het licht in zich gevangen houdt: er is dan totale reflectie.

In tegenstelling tot de situatie bij de overgang van optisch dunner naar optisch dicht medium, waarbij reflectie en breking tegengestelde tendensen vertegenwoordigen, zien we hier dat de tendensen van reflectie en breking in dezelfde richting werken. De bij schuinere inval toenemende reflectie komt bij de overgang van optisch dicht naar optisch dunner medium in dienst te staan van het gevangen houden van het licht.

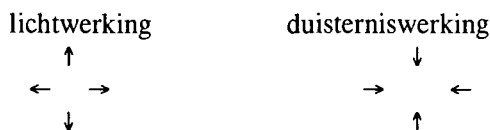
Behalve de hoek tussen lichtbundel en grensvlak kunnen we ook het optische dichtheidsverschil variëren. Daarbij doen zich geen nieuwe fenomenen voor. Is het optische dichtheidsverschil groter, dan nemen alle aspecten toe die bij schuinere inval toenemen. Tenslotte kan men in plaats van een scherpe licht/donkergrens ook een geleidelijke overgang creëren

door een dia met een geleidelijk transparantieverloop op het aquarium te projecteren. Deze verlopende licht/duisterovergang is dan óók in het optisch dichte medium te vinden. In samenhang hiermee zijn de kleurranden wazig met weinig contrast en lichtzwakke kleuren. Ook dit levert geen wezenlijk nieuw fenomeen op, immers geen enkele licht/duisterovergang is volmaakt scherp. In het geval van een geleidelijk verlopende licht/duistergrens heeft men het onscherpe van elke overgang slechts uitvergroet.

Kunnen we begrijpen dat een optisch dicht medium een zuigende respectievelijk verdichtende werking heeft ten opzichte van het licht dat de overgang passeert van media met verschillende optische dichtheden? Zulke media hebben gewoonlijk ook een grotere massadichtheid. In onderstaande tabel is als maat voor de optische dichtheid de brekingsindex genomen:

	<i>massadichtheid</i> kg/dm ³	<i>brekingsindex</i> (geel)
ijs	0.9	1.3
water	1.0	1.3
benzeen	0.9	1.5
plexiglas	1.2	1.5
glycerol	1.3	1.5
koolstofdisulfide	1.3	1.6
kwarts	2.2-2.5	1.5
flintglas, licht	3.1	1.5
flintglas, zwaar	3.9	1.9
diamant	3.5	2.4

Uit de tabel is te zien dat stoffen met een grotere massadichtheid vaak ook een grotere brekingsindex of optische dichtheid hebben. Gemiddeld is de brekingsindex van vaste stoffen, groter dan die van vloeistoffen. Hieruit blijkt dat er mogelijk een samenhang bestaat tussen de met de massadichtheid verbonden eigenschappen als compactheid, starheid, onmengbaarheid en de brekingsindex. De dynamiek die optreedt als een stof afkoelt, waarbij de stof krimpt en dus een grotere dichtheid krijgt, kan worden teruggevonden in de werking die de doorzichtige stof op het licht uitoefent: het in of naar de stof toe zuigen respectievelijk het verdichten van het licht. Deze werking van het optisch dichte medium op het licht vertegenwoordigt de duisterniswerking die van de stof uitgaat. Lichtwerking en duisterniswerking hebben een tegenovergesteld karakter: de ene is uitbreidend, de ander samentrekkend.



3.3.3 De dynamiek van de kleurranden

We richten nu onze aandacht nader op de kleurranden die bij breking van een licht/donkergrens optreden. Bekijken we eerst weer de situatie waar een evenwijdige bundel licht onder een schuine hoek van een optisch dunner naar een optisch dichtere medium overgaat. De bundel breekt het dichtere medium in. Aan de ene kant (in de "binnenbocht") ontstaat een blauw/violette kleurrand, aan de andere kant (in de "buitenbocht") ontstaat een geel/rode kleurrand. Zie de betreffende figuur.

De blauw/violette rand maakt een uitwaaierende indruk: het lichtblauw, dat aan het licht grenst, vormt een smalle rand, terwijl het violet breed uitstraalt in het duistere gebied en daarbij langzaam in lichtintensiteit afneemt. Het is alsof het licht, dat uit zichzelf rechtdoor zou willen gaan, maar door de zuigende werking van het dichtere medium afgebogen wordt, aan deze kant van de bundel toe kan geven aan zijn neiging tot straling.

De rood/gele kant vertoont een geheel andere, tegenovergestelde dynamiek. Vanuit het licht vindt er eerst een zeer geleidelijke overgang naar geel plaats, die een even grote breedte inneemt als het licht aan de andere kant. Dan gaat het geel via een weinig oranje over in een smal rood gebied, dat vrij abrupt overgaat in duisternis. De stuwing die deze kleurrand te zien geeft, wekt de indruk van confrontatie of verzet. Dat stemt overeen met de situatie aan deze kant van de bundel, waar het streven van het licht "recht door zee" te gaan door de zuigende werking van het dichtere medium wordt tegengewerkt.

Onderzoekt men de situatie waarin de lichtbundel onder een schuinere hoek overgaat van een optisch dichtere naar een optisch dunner medium, dan vindt men hetzelfde resultaat: weer verschijnt de blauw/violette kleurrand aan die kant, waar het licht "de ruimte krijgt" voor zijn tendens tot uitbreiding; weer treedt de geel/rode kleurrand op aan die kant, waar deze tendens weerstand ondervindt. Aan de geel/rode kant dus stuwing, die erop duidt dat het licht zich actief tegen de zuigende werking van het dichtere medium verzet. Aan de blauw/violette kant uitwaaiering, die aangeeft dat het licht hier meegeeft met die zuigende werking. Het is als bij het zwemmen in een rivier: ga je tegen de stroom in, dan ervaar je tegendruk; ga je met de stroom mee, dan geef je je over. Dit zijn welis-

waar stoffelijke omstandigheden, terwijl de werkingen die van het dichtere medium uitgaan wel stofgebonden maar niet stoffelijk zijn. De dynamiek is echter vergelijkbaar.

Samenvattend komen we tot het volgende. Valt een lichtbundel onder een schuine hoek op het grensvlak van twee media met verschillende optische dichtheid, dan wordt de bundel gebroken, en wel zodanig dat de richtingverandering kan worden toegeschreven aan een zuigende werking van het dichtere medium. Daarbij ontstaat aan de ene kant van de gebroken lichtbundel een geel/rode, aan de andere kant een blauw/violette kleurrand. Deze verschillende kleurranden hangen samen met de verschillende verhoudingen tussen de zuigende duisterniswerking en het stralingskarakter van het licht. *De geel/rode kleurrand ontstaat daar, waar het licht zich verzet tegen de duisterniswerking en hierdoor een verdichting of stuwing oproept. De blauw/violette kleurrand ontstaat daar, waar het licht zich uitbreidend overgeeft aan de inzuigende duisterniswerking.* Dit is als oerfenomeen van de prismatische kleuren te beschouwen.

3.3.4 Kleur als wisselwerkingsresultaat van licht en duisternis

Zowel bij de verschijnselen van de hemelkleuren (paragraaf 3.2) als bij de dynamiek van de prismatische kleurranden (paragraaf 3.3.3) kunnen we het ontstaan van de kleuren zien als resultaat van een wisselwerking tussen licht en duisternis. De wisselwerking verschijnt op twee verschillende manieren.

Vervolgt men het ontstaan van geel en rood, dan valt op dat dat gepaard gaat met een proces van verdichting. Bij de prismatische geel/rode kleurrand is het geel breed en verzadigt zich slechts langzaam tot oranje. Daarna volgt een snelle overgang naar rood, dat na het karmijnrood vrij abrupt in het duistere gebied eindigt. Het licht, hebben we gezien, streeft hier tegen de duisterniswerking in en roept daardoor van de kant van de duisternis een verdichtende werking op. In het geel is deze verdichting nog minimaal. Juist hierdoor komt in deze kleur het stralend-uitbreidende karakter van het licht naar voren. Het ongekleurde licht heeft een geweldige stralende potentie die, net als bij de ondergaande zon, in het prismatische geel aan de eerste mate van verdichting door de duisternis in verschijning kan treden. Bij een verdergaande verdichting kan het licht dit stralende karakter tegenover de duisternis niet staande houden. In de wisselwerking met de duisternis ontwikkelt het licht echter een nieuwe hoedanigheid, die als een omvorming van het stralende kan worden gezien. Doordat het licht verder in de verdichtende duisternis doordringt bundelt zich deze stralende kwaliteit tot een doordringings-

kracht. Deze nieuwe kwaliteit ervaren we aan het rood en wordt gewoonlijk omschreven als fel of knallend.

De verhouding van het licht tegenover de duisternis aan de geel/rode kant is *actief*. Het licht verzet zich tegen de inzuigende werking van de duisternis. Naar Goethe kunnen we in dit verband spreken over de *daden van het licht*.

Aan de andere kant zien we het ontstaan van blauw en violet. Het violet heeft dat merkwaardige 'van binnenuit' stralende karakter en doet voorwerpen oplichten alsof er een deken van licht over ligt. Het stralende karakter van het geel is ruimtelijk, 'uiterlijk' stralend, het violet daarentegen straalt 'van binnen uit', onruimtelijk. Bij de blauw/violette prismatische kleurrand hebben we vastgesteld dat het licht uitstraalt in de zuigende duisternis. We vinden dit in-het-zuigende-uitstralen terug in de kwaliteit diepte van de kleur blauw. Net als bij het blauw aan de hemel neemt de zuigende duisternis dit naar zich toe stralende licht diep in zich op en wordt door het inzuigen van het stralende licht aangezet zélf, maar nu 'van binnenuit', te gaan stralen. Het zuigende poolt hierbij om tot een van binnenuit stralen. Op deze wijze wordt ook begrijpelijk dat violette bloemen tijdens de schemering het langst zichtbaar zijn. Als geen andere kleur meer waarneembaar is, staan de violette bloemen 'van binnenuit' nog na te stralen. Dit wordt het Purkinje-effect genoemd.

De verhouding van het licht tegenover de duisternis aan de zijde van het blauw/violet is *passief*. Het licht straalt uit in het verlengde van de zuigende duisternis. Goethe sprak in het geval van de blauwe kleuren over het *lijden van het licht*. De hier besproken actieve en passieve verhouding van het licht tegenover de duisternis vertegenwoordigen eenzijdige ontwikkelingen tussen het licht en de duisterniswerking, omdat het ontwikkelingen in één richting betreft.

Groen en magenta ontstaan bij een smalle lichtbundel in een duistere, respectievelijk een smalle bundel duisternis in een lichte omgeving, die schuin op de overgang van media met verschillende dichtheid valt. Maken we in een dergelijke situatie een lichtbundel steeds smaller, dan ontstaan eerst de kleurranden rood/geel en blauw/violet met daartussen een smaller wordend lichtgebied. Zodra het geel en het lichtblauw elkaar raken, ontstaat een licht, fris groen, dat bij verder versmallen van de bundel donkerder en verzadigder van tint wordt. Tegelijkertijd verdwijnt het geel en lichtblauw steeds meer. Uiteindelijk blijven alleen de kleuren rood, donkergroen en violet over. Tenslotte eindigt alles in duisternis:

duister - rood - geel - wit - lichtblauw - violet - duister
 duister - rood - geel - groen - blauw - violet - duister
 duister - rood - donkergroen - violet - duister
 duisternis

We stellen vast dat het geheel naar de duisternis toe tendeert. Het licht verdwijnt, de lichte kleuren ook, terwijl donkerder kleuren ontstaan. Blijkbaar hangt dit samen met het smaller worden van de lichtbundel, waardoor er inderdaad steeds minder licht beschikbaar is. Het groen dat ontstaat kan niet worden gezien als het mengproduct van geel en blauw. Immers het zou hier dan handelen om het mengen van gekleurd licht (additief mengen). Subtractief mengen van bijvoorbeeld gele en blauwe verf geeft groen, terwijl het additief mengen van deze kleuren juist een groenig wit geeft. We moeten het ontstaan van het groen echter ook heel anders begrijpen. Het groen treedt op wanneer het laatste station op weg naar de duisternis gepasseerd wordt. De eenheid die de lichtbundel vertegenwoordigt staat op het punt te verdwijnen en te polariseren in tegengestelde eenzijdige ontwikkelingen, namelijk in actieve en passieve zin, uitmondend in rood en violet. Wat is nu de plaats van het groen in deze differentiatie? Het groen als kleur wordt gekenmerkt door een grote evenwichtigheid. Noch het doordringende, op je af komende van rood, noch het wijkende, zuigende van violet zijn in het groen terug te vinden. Het groen vertegenwoordigt het midden tussen deze uitersten, maar is anderzijds zelf ook het resultaat van een eenzijdige ontwikkeling. Dit wordt duidelijk als men het licht van een dia, waarin boven elkaar een rood, een groen en een violet filter zijn bevestigd, door een prisma laat vallen. Het rood ontwikkelt zich tot een diep karmijn dat scherp aan de duisternis grenst. Met andere woorden, het rode licht ontwikkelt zich verder in actieve zin en verdicht daarbij tot karmijn. Het violet ontwikkelt zich juist tot een ver in de duisternis uitstralend, langzaam verblekend violet, ofwel het violette licht ontwikkelt zich verder in passieve zin. Het groen blijkt zich nu op geen enkele wijze te ontwikkelen, niet op actieve, tegen de duisterniswerking in strevende en niet op passieve, met de zuigende duisternis meestralende wijze.

rood	→	diep karmijnrood	actief
groen	→	groen	actief noch passief
violet	→	violet/verblekend	passief

Het magenta kan op vergelijkbare wijze worden benaderd. Deze kleur ontstaat 'op weg naar het licht', wanneer we een door een prisma geworpen bundel duisternis (schaduw) steeds verder versmallen. Zodra

het violet en het rood van de twee kleurranden elkaar raken, ontstaat deze opvallende purperachtige kleur, die bij een verder versmallen in een licht perzikbloesem overgaat. Tenslotte eindigt alles in licht:

licht - lichtblauw - violet - duister - rood - geel - licht
licht - lichtblauw - violet - rood - geel - licht
licht - lichtblauw - magenta - geel - licht
licht

Terwijl door het versmallen van de duisternisspleet het licht toeneemt, is deze tendens van lichter worden ook in de bovenstaande kleurenontwikkeling te vinden. De donkere kleuren verdwijnen, de lichte kleuren blijven over en worden ook steeds lichter van tint. Zo is het eerste magenta nog vrij donker, terwijl het magenta van een uiterst smalle duisternisspleet zachtroze is. Waar het groen ontstaat op het moment dat de eenheid die de lichtbundel vertegenwoordigt op het punt van verdwijnen staat, treedt het magenta in verschijning als de eenheid van de lichtbundel bijna geheel is hersteld, namelijk als de duisternisspleet uiterst smal is. Doen we nu een overeenkomstige proef als bij het groen, maar nu met een rood, een magenta en een violet folie in een dia, dan zien we dat het magenta zich bij het passeren door het prisma in zowel actieve als passieve zin ontwikkelt:

rood	→ karmijnrood	actief
magenta	→ karmijnrood-magenta-violet/verblekend	actief en passief
violet	→ violet/verblekend	passief

Magenta blijkt de volledige in het ongekleurde licht bevatte potentie te vertegenwoordigen, namelijk het vermogen om in actieve én passieve zin, tegen de duisterniswerking in strevend of er in meegaand, tot ontwikkeling te komen. Magenta omvat de gehele polariteit actief-passief, het is de synthese ervan. Alleen het neutrale midden, het evenwicht, ontbreekt. De gewaarwording van de kleur magenta levert ook een innerlijke spanning op. De kleur heeft zachtheid én felheid, is tegemoetkomend én onbuigzaam.

Als we de zes kleuren volgens de kleurencirkel van Goethe ordenen dan ontstaat het volgende beeld:

magenta
op weg naar de eenheid
synthese:
actief en passief

rood
actief,
bundeling tot
doordringings-
kracht

geel
eerste verdichting
doet het stralende
in verschijning
treden

violet
passief,
opgezogen licht
doet duister van
binnenuit stralen

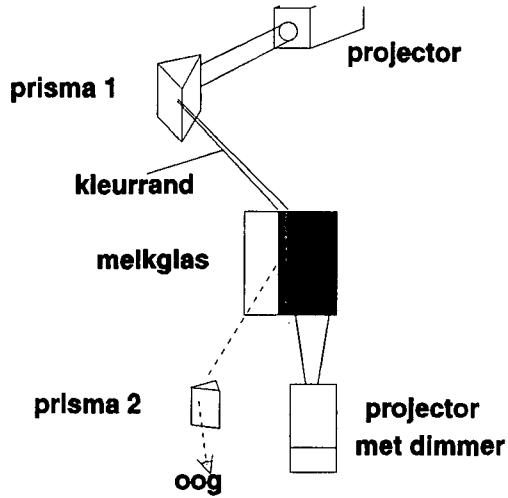
lichtblauw
licht wijkt tot
zuigend duister,
nog geen diepte

groen
de eenheid wordt verlaten,
passief noch actief,
evenwicht, neutraal midden

3.3.5 De ontwikkelingsmogelijkheden van prismatische kleur

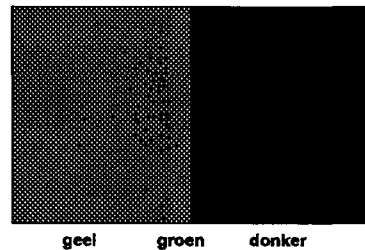
Kleur werd in het voorgaande beschreven als het eindresultaat van wisselwerkingen tussen licht en duisternis. Daardoor mogen we kleur beschouwen als iets dat zowel door licht- als duisterniswerking ontstaat. In de vorige paragraaf hebben we gezien dat als we gekleurd licht door een prisma laten vallen, de betreffende kleur zich dan in wisselwerking met de duisternis in passieve of actieve zin verder zal ontwikkelen. Rood licht kan bijvoorbeeld nog verder verdicht worden tot karmijnrood, maar niet in passieve zin ontwikkeld worden. Dit betekent dat we gekleurd licht mogen beschouwen als in eenzijdige richting ontwikkeld licht. Tegelijkertijd kunnen we een kleur ook beschouwen als in eenzijdige richting ontwikkelde duisterniswerking, zoals het violet, waarbij de duisternis tot een van binnenuit stralen is gebracht. Wanneer we een gekleurde lichtbundel door een prisma laten vallen, hangt het van het gebied naast de bundel af of men het gekleurde licht primair als duisternis- of als lichtbundel moet beschouwen. Is het naastliggende gebied lichter, dan kan men het gekleurde licht primair als duisternis beschouwen en omgekeerd. Dit blijkt ook uit de volgende proef.

Projecteer een geel /rode kleurrand van een gebroken lichtbundel op een melkglazen plaat. Op de achterzijde van de plaat is de helft van het melkglas verticaal afgeplakt met wit papier, dat in een verder verduisterde omgeving donker zal zijn. Naast het papier ziet men nu aan de achterzijde bijvoorbeeld het geel van de dóórschijnende geel/rode kleurrand. Op het papier projecteert men nu



vanaf de achterzijde het ongekleurde licht van een diaproyector, waarvan de lichtsterkte met behulp van een dimmer kan worden geregeld. Hierdoor verschijnt naast de gele kleurrand duister, halfduister of licht, al naar gelang de instelling van de dimmer. Wederom van de achterzijde bekijkt men dit beeld door een prisma, waarbij het vlak van breking verticaal gehouden wordt en de breking naar rechts in de tekening plaats vindt (zie figuur).

Heeft het papier naast de gele kleurrand een middelmatige lichtsterkte, dan ziet de gele kleurrand er door het prisma gezien niet anders uit dan zonder prisma. Is het papier naast de gele kleurrand echter donker, dan werkt de gele kleurrand als licht. Door het prisma gezien heeft het geel nu een groene rand.

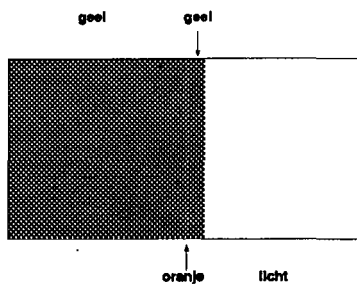


Verstelt men nu de dimmer terwijl men door het prisma blijft kijken, dan ziet men het papier naast het geel oplichten, terwijl de groene rand naast het geel verdwijnt. Men ziet nu het geel weer zonder kleurrand. Draait men de dimmer nu nog verder op, zodat het papier naast de gele kleurrand nog lichter wordt, dan gaat dit als licht ten opzichte van het meer duistere geel werken. Nu ziet men dat het geel een smalle oranje rand krijgt.

Het geel als actieve, tegen de duisterniswerking in strevende kleur, kan zich in actieve richting verder ontwikkelen, namelijk van geel tot oranje. Doordat het slechts een geringe duisterniswerking op het licht van

het papier uitoefent, is ook de verdichting relatief gering. Passief, met de zuigende duisternis meebevegend, kan het geel zich niet ontwikkelen. Wel verdwijnt naast het donkere papier het actieve element uit de kleur en wordt het geel tot groen, dat actief noch passief is.

Op deze wijze kan men het besproken fenomeen of varianten daarvan steeds weer beschouwen vanuit de idee, dat alle kleur ontstaat in dynamische wisselwerking van licht en duisternis. De beschreven proef kan voor alle kleuren worden uitgevoerd, zodat de ontwikkelingsmogelijkheden van alle kleuren ten opzichte van licht, halfduister of duister kunnen worden nagegaan. Bekijkt men het gele licht van een natriumlamp op de geschetste wijze, dan blijkt dat dit gekleurde licht zich op geen enkele wijze kan ontwikkelen. Blijkbaar betreft het hier licht dat zich op een volslagen eenzijdige wijze ontwikkeld heeft, zodat verdere ontwikkeling uitgesloten is. In plaats van te spreken van monochromatisch licht, zou men wellicht beter van eenzijdige kleur kunnen spreken.



3.3.6 De eenheid van het licht

Bij het in paragraaf 3.3.1 beschreven grote waterprisma kan men nog de volgende waarnemingen doen. Als men een brede lichtbundel door het prisma laat gaan, dan is er in en achter het prisma tussen de kleurranden een groot gebied waar geen kleur valt waar te nemen. Houdt men nu in dit gebied een stuk doorzichtig materiaal, dan zijn er achter deze schaduwwerper licht/donkergrenzen die direct ook kleurranden vertonen. Hoe kunnen we dit fenomeen begrijpen?

Het licht treedt op het moment van het passeren van de overgang lucht/water in wisselwerking met de duisterniswerking van het water. Deze wisselwerking kan echter nog niet tot het ontstaan van kleur leiden, als niet een noodzakelijke voorwaarde is vervuld, namelijk dat de lichtbundel moet grenzen aan een duister gebied. Wordt deze voorwaarde pas na het passeren van de grens tussen de twee media vervuld, dan kan de kleur alsnog in verschijning treden. We kunnen dit nog anders formuleren. Is licht eenmaal een overgang van stoffen met verschillende optische dichtheid gepasseerd, dan is het de wisselwerking met de duisternis aangegaan, waardoor het de *potentie* heeft de kleuren te vormen. Deze potentie kan blijkbaar slechts geactualiseerd worden op een grens van licht

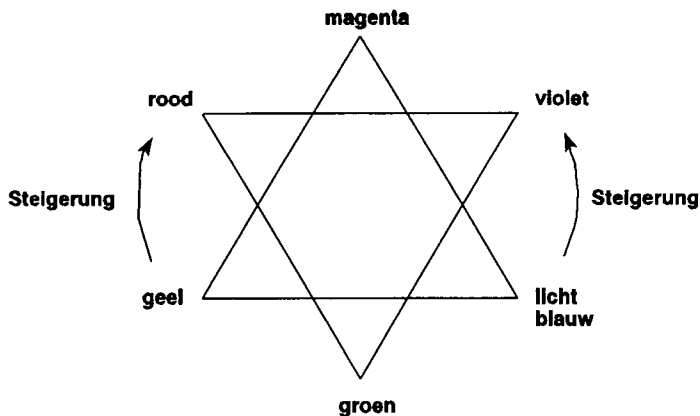
en donker; of deze grens zich nu vóór, ín of áchter de overgang tussen de media met verschillende optische dichtheid bevindt, is niet relevant!

Dit stelt ons voor de vraag waaróm de wisselwerking tussen licht en duisternis slechts actueel kan worden aan de rand van licht en donker. Binnen een homogene lichtbundel is, na het passeren van een overgang tussen media met verschillende optische dichtheid, geen kleur te zien. Zodra er enige nuanceverschillen in lichtsterkte - ofwel in licht en donker - optreden, ontstaat er wel kleur. Newton gaat er in zijn kleurenleer vanuit, dat er in een lichtbundel die een overgang gepasseerd is kleuren zijn die zich mengen tot wit. Maar niets in de waarneming dwingt ons ertoe deze vooronderstelling van Newton te volgen. Blijven we bij de waarneming, dan kunnen we slechts concluderen dat het licht binnen de bundel zich gedraagt als een eenheid, die zich alleen op een overgang licht/donker in zijn kleurverschijningen kan tonen. Binnen de eenheid van de lichtbundel is de ontwikkeling tot kleur niet mogelijk, slechts de potentie ertoe kan met het licht verbonden zijn. Alleen aan een grens kan door de interactie kleur ontstaan. Net als de warmte vertegenwoordigt het licht het eenheidsprincipe in de natuur. Gloeiende substantie bijvoorbeeld is als lichtbron geen drager van specifieke stoffeigenschappen van die substantie. Alle stoffen gloeien op dezelfde manier. Tegenover de eenheid van licht staat de differentiërende werking van de duisternis. Als substantie duisternis vertegenwoordigt, is deze duisterniswerking wel drager van stoffeigenschappen, zoals vorm. Ook de licht/donkergrenzen van een lichtbundel zijn een gevolg van de aanwezigheid van substantie. Op deze grenzen wordt specialisatie in de zin van ontwikkeling in een bepaalde eenzijdige richting mogelijk.

Het thema van eenheid en specialisatie van het licht kunnen we ook verbinden met het verschijnsel van de camera obscura. Maakt men in een zwart karton een klein gaatje waar het licht van een kaarsvlam door valt, dan is aan de andere zijde op een wit vel papier een omgekeerd lichtbeeld te zien in de vorm van een kaarsvlam. Dit lichtbeeld wordt zwakker, maar ook des te scherper, naarmate het gaatje in het zwarte karton kleiner is. De vorm van het gat doet dan ook niet meer ter zake. Deze proef zou men voor elke positie van kaars, karton en wit papier kunnen herhalen. Telkens ontstaat een ander lichtbeeld. Deze beelden ontstaan door het plaatsen van duisternis. We bemerken aan een dergelijk voorbeeld hoe sterk een lichtruimte een geheel vormt. Het ontstaan van een specifiek beeld binnen dit geheel treedt slechts op door het plaatsen van substantie (duisternis) in de lichtruimte rondom de kaarsvlam.

3.4 Goethe's kleurencirkel

De kleurencirkel van Goethe is veel meer dan alleen maar een schema. Het is een beeld dat naast wezenlijke samenhangen tussen de verschillende kleuren ook het wezen van de kleurenwereld als geheel uitdrukt. Steiner noemde zulke beelden, die iets wezenlijks uitdrukken, *imaginaties*. Leerlingen kunnen iets van dit imaginatieve karakter ervaren als men vanuit verschillende blikrichtingen de kleurencirkel beschouwt. Als de tijd het toelaat zou men de leerlingen de kleurencirkel kunnen laten schilderen, waarbij de kleuren geleidelijk in elkaar over lopen, terwijl ze naar het hart van de cirkel overgaan in wit en naar de buitenrand toe overgaan in zwart. Juist hierdoor *belev*en zij iets van het wezenlijke van de kleurenwereld als een geheel. We zullen nu verschillende aspecten van Goethe's kleurencirkel nader belichten.



De tegenstelling tussen de donkere en de lichte kleuren

Gaat men de kleurencirkel rond, dan vindt men afwisselend kleuren die in de prismatische kleurverschijnselen van nature donker respectievelijk licht zijn. De drie donkere kleuren rood, violet en groen vormen het zogenoemde *donkere triplet*, de lichte kleuren geel, lichtblauw en magenta het *lichte triplet*. Het donkere triplet bevat de hoofdkleuren van het Newtonspectrum, het spectrum van een smalle lichtbundel, dat zoals we in paragraaf 3.3.4 hebben gezien bij verdergaande versmalling geen geel en lichtblauw meer bevat, maar enkel nog rood, groen en violet. Van dit spectrum hebben we toen geconcludeerd dat het 'op weg naar de duisternis' ontstaat; bij verder versmallen van de lichtbundel worden de genoemde kleuren ook steeds donkerder. Omgekeerd bevat het lichte triplet de

hoofdkleuren van het Goethespectrum, het spectrum van een smalle duisternisbundel, dat bij verdergaande versmalling geen rood en violet maar enkel nog geel, magenta en lichtblauw bevat, kleuren die bij verder versmallen van de duisternisbundel steeds lichter worden.

Additieve en subtractieve menging

Mengt men twee kleuren van het lichte triplet subtractief (als pigment of door middel van gekleurd folie), dan ontstaat de in de kleuren-cirkel tussenliggende kleur van het donkere triplet. Mengt men alle drie de kleuren van het lichte triplet, dan ontstaat een kleur die tendeert naar zwart. Met gekleurde folies en een projector valt dit goed te demonstreren. Aansluitend kan men de leerlingen vertellen (of een leerling een spreekbeurt laten houden) over kleurendruk, waar men gebruik maakt van de pigmenten geel, lichtblauw, magenta en zwart.

Mengt men twee kleuren van het donkere triplet additief (twee gekleurde lichtbundels op één scherm projecteren), dan ontstaat de in de kleurencirkel tussenliggende kleur van het lichte triplet. Mengt men met drie projectoren rood, violet en groen licht, dan tendeert het beeld meer naar wit naarmate men de kleuren beter kiest. Aansluitend kan de kleurentelevisie ter sprake worden gebracht, waar dicht naast elkaar liggende kleurpuntjes of kleurlijnen voor het oog additief mengen.

Dat het additief mengen een lichter en het subtractief mengen een donkerder effect oplevert, hoeft ons niet te verbazen; wel is opmerkelijk dat er nieuwe kleuren ontstaan. Bij subtractief mengen van bijvoorbeeld pigmenten mengt men substanties. De duisterniswerking die met deze substanties verbonden zijn doet de resulterende kleur donkerder worden. Bij het additief mengen zal het lichtaspect van het gekleurde licht in het mengen overheersen, zodat als resultaat een lichtere kleur ontstaat.

Steigerung en culminatie

Goethe stelde dat als men de twee meest aan het licht verwante kleuren neemt, namelijk geel en lichtblauw, men dan beide kleuren in een proces van intensivering of "Steigerung" kan brengen. Bij de omvorming van geel tot rood is het licht actief in wisselwerking met de duisternis, bij de omvorming van lichtblauw tot violet passief. Al eerder werd de wisselwerking tussen licht en duisternis in beide processen nader beschreven.

Mengt men op additieve wijze de beide eindresultaten van deze eenzijdige ontwikkelingswegen, rood actief en violet passief, dan ontstaat een synthese van deze twee uitersten, het magenta. Omdat het magenta deze uitersten op een zeer harmonische wijze in zich verenigt, beschreef Goethe het ontstaan ervan als een bekroning, een culminatie.

Mengt men het geel en het lichtblauw direct, zoals Goethe het noemt op de eerste ontwikkelingstrap, op subtractieve wijze, dan bereikt men in het groen een soort evenwicht tussen de actieve en passieve tendens in het licht.

Complementaire kleuren

Bekijkt men het nabeeld van een kleur door een tijdje naar een kleurvlak van één kleur te staren en vervolgens naar een witte achtergrond, dan ziet men de complementaire kleur. Een bekend strijdpunt is of rood en groen complementaire kleuren zijn of magenta en groen. Wij willen hier één fenomeen noemen dat pleit voor laatstgenoemde zienswijze. Bekijk het spectrum van een lichtspleet die exact boven een duisternisspleet is geplaatst, je ziet dan het Newtonspectrum exact boven het Goethespectrum. Van links naar recht vertonen beide spectra dezelfde dynamiek:

rood - groen - violet
blauw - magenta - geel

dynamiek: smal - breder - breed uitwaaierend

Bekijk nu het nabeeld van dit duo-spectrum, je ziet dan exact hetzelfde beeld, maar dan ondersteboven. Dit is voor leerlingen een zeer verrassende proef. Hieruit komen als complementaire kleurparen naar voren rood-lichtblauw, groen-magenta en geel-violet.

Vervolgens kan men de tegengestelde eigenschappen van deze complementaire paren bekijken:

rood

het licht ondergaat verdichting,
rood werkt op de ziel door-
dringend, op je af komend

geel

stralingskracht van het licht
treedt in verschijning door
verdichting door de duisternis,
uiterlijk, ruimtelijk stralend
open, vrolijke stemming

lichtblauw

licht straalt uit naar het oneindige
de zielestemming bij lichtblauw is
wijkend, ademend

violet

duisternis gaat van binnen uit
stralen door opgezogen licht,
onruimtelijk, innerlijk stralend,
ernstige, meditatieve stemming

groen

het licht is actief noch passief in wisselwerking met de duisternis, rustende, evenwichtige stemming

magenta

het licht is actief én passief in wisselwerking met de duisternis, tegengestelde zielestemming van zacht naast fel

Om de genoemde zielestemmingen goed te kunnen peilen kan men verschillende technieken gebruiken. De kleurwiggén die door Ruud van Renesse werden ontwikkeld zijn heel geschikt voor dit doel*. Deze wiggén verlopen van geel tot rood, respectievelijk van lichtblauw tot violet. De geel/rode wig bevat water met een combinatie van caroteen, dat geel tot oranje kleurt, en een weinig rood pigment. Projecteert men licht door de wig, dan ziet men vanaf de punt tot aan het brede stuk zacht geel, oranje en rood. De lichtblauw/violette wig bevat water met methylblauw. Projecteert men licht door de wig, dan ziet men vanaf de punt tot aan het brede stuk lichtblauw, diepblauw, violet. Door de punten van de wiggén achter elkaar te schuiven krijgt men groen; door de brede kanten van de wiggén tegen elkaar aan te plaatsen worden tengevolge van het prismatische effect rood en violet additief gemengd tot magenta. Laat nu bijvoorbeeld een groepje leerlingen afgezonderd een bepaalde kleur bekijken en op zich in laten werken. Terug in de klas beschrijven ze vanuit die stemming de betreffende kleur zonder hem zelf te noemen; de klasgenoten raden om welke kleur het gaat.

De mens ziet, na naar een bepaalde kleur gekeken te hebben, de complementaire kleur als nabeeld. We noemen hier nog enige proeven die men daartoe met de leerlingen kan bekijken.

- Laat de leerlingen naar het centrum van gekleurde vierkanten staren gedurende ongeveer 30 seconden. Men ziet de complementaire kleur reeds af en toe aan de randen tevoorschijn komen. Haal nu het gekleurde vierkant weg en laat hen naar de witte achtergrond staren. Eventueel knipperen met de ogen helpt om de nabeeldkleur tevoorschijn te laten komen. De nabeeldkleur is lichtend. De vorm dekt precies de vorm van de oorspronkelijk bekeken kleur.
- Herhaal de proef, maar in plaats van het gekleurde vierkant weg te halen laat men de leerlingen de blik op de rechter rand van het gekleurde vierkant focussen. Men ziet de nabeeldkleur nu alleen over de rechter helft van het gekleurde vierkant. Dit deel is flets van kleur, in tegenstelling tot het linker deel dat feller van kleur is.

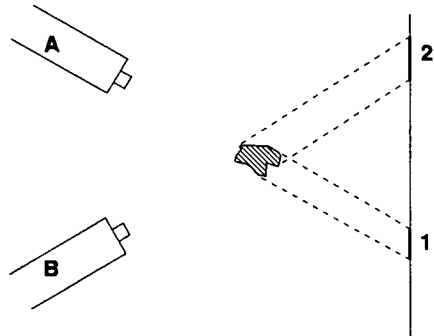
* Ruud van Renesse: *Bouw van een waterprisma*.

- Bekijkt men een veld knalrode tulpen dan doet dit haast pijn aan de ogen. Blijft men echter kijken, dan wordt de kleur fletser. Verplaatst men nu de blik naar het rechterdeel van het veld, dan ziet men net als in de vorige proef dit rechterdeel fletser, terwijl het linkerdeel weer even fel is als voorheen.

De nabeeldkleur heeft een lichtende kwaliteit en dempt onze kleurwaarneming. Dit bracht Goethe ertoe de nabeeldkleur als innerlijk licht te beschouwen, dat de ziel bij het waarnemen van kleur als een evenwicht scheppend antwoord voortbrengt. De mens kijkt met zijn bewustzijn de wereld in en de indrukken van die wereld komen als beeld in het oog. Deze twee stromen ontmoeten elkaar in het zien en de lichaamsprocessen zorgen voor de bewustwording van deze ontmoeting tussen uiterlijk en innerlijk licht. Fysiek gezien worden de kleurkegeltjes van het oog door het zien van bijvoorbeeld rood aangedaan, waardoor we deze kleur minder sterk waarnemen. We kunnen dan met ons bewustzijn alleen nog door de kleurkegeltjes van de twee overige kleurgroepen, groen en violet, kijken. Bekijkt men nadien een wit vlak, dan ziet men weinig rood, maar wel groen en violet die samen lichtblauw geven.

Aansluitend kan men de gekleurde schaduw behandelen.

- Neem twee lampen of kaarsen die een relatief scherpe schaduw geven (dus geen lens gebruiken) en vermijdt overbelichting. Projector A brengt schaduw 1 voort en belicht schaduw 2, waardoor deze minder donker is. Op dezelfde wijze belicht projector B schaduw 1. Houdt men nu voor projector A een rood folie, dan zal schaduw 1 roodachtig worden, maar schaduw 2 verrassenderwijze lichtblauw.



Over het begrijpen van deze proef is reeds veel discussie gevoerd. We zullen dit fenomeen in samenhang met de nabeeldkleuren beschouwen. Een schaduw van een gekleurde lichtbron die door een tweede lichtbron wordt opgelicht geeft net als het nabeeld de complementaire kleur, maar dan vrijwel direct. Een nabeeld lijkt zich pas na enige tijd te vormen. Het nabeeld is er echter wel onmiddellijk, maar het oog moet flink worden aangedaan wil er een blijvend nabeeld gevestigd worden. Kijkt

men nu door een koker naar de gekleurde schaduw of maakt men de schaduw zeer groot, dan is het effect weg. De inbedding van een opgelichte schaduw in rood licht geeft dus de juiste conditie voor de gekleurde schaduw, die ontstaat door de mens die kijkt. Bij het nabeeld ontstaat de nabeeldkleur op de plaats waar het oog door het rood wordt aangedaan. Bij de gekleurde schaduw ziet men eveneens een nabeeldkleur ter plekke van de met rood licht gekleurde omgeving; dit nabeeld reikt over de schaduw heen, mits deze niet te groot is.

Het ervaren van de kleurencirkel als een geheel

Door tussen de verschillende aspecten van de kleurencirkel die hiervoor werden behandeld heen en weer te bewegen en door anderzijds de kleurencirkel te ervaren middels het schilderen of tekenen ervan, gaan de leerlingen iets van het wezenlijke van de kleurencirkel als een geheel ervaren. Zij bemerken dat een kleur niet apart op zichzelf staat, maar dat kleuren ingespannen staan tussen licht en duisternis, het binnenste en buitenste van de cirkel. Anderzijds vullen de kleuren in hun verschillende karakters elkaar onderling aan tot een geheel. Het beleven van de zinvolle samenhang van de kleuren kan een belangrijke ervaring voor leerlingen zijn, daar zij op een leeftijd zijn waarop zij gaan ervaren dat hen als individu ook een zinvolle plaats in een sociaal verband als de klas of de school toekomt.

3.5 Newton en Goethe

De kleurenleer van Newton wordt hier niet in detail behandeld, daar deze bekend is en er genoeg boeken bestaan over dit onderwerp.

Als men de kleurenleren van Newton en Goethe wil gaan behandelen, kan men zich afvragen in welke volgorde men dat zal gaan doen. Hier zijn twee gezichtspunten mogelijk. De historische volgorde houdt in, dat men eerst Newton behandelt en daarna Goethe. Daarmee plaatst men beide ook in het ontwikkelingsperspectief van de mensheid. Eerst heeft zich de materialistische zienswijze ontwikkeld, die in hoge mate samenhangt met het modelmatige denken. Daarmee maakte de mens zich geestelijk gezien zelfstandig, sneed hij de navelstreng door die hem verbond met de geestelijke wereld, maar raakte eenzijdig op de materie georiënteerd. De verschillende pogingen die in deze eeuw zijn ondernomen om tot een alternatief te komen tegenover het zich te eenzijdig ontwikkelende reductionistische modelmatige denken, zijn voorafgegaan door het werk van Goethe en in zekere zin door dat van Faraday. Deze nieuwe richtingen hebben gemeen dat zij de geestelijke dimensie van

natuurfenomenen willen betrekken in het onderzoek. Volgt men met de leerlingen deze route, dan ervaren zij bij de behandeling van Goethe's kleurenleer, hoeveel moeilijker het is om langs fenomenologische weg tot hetzelfde gevoel van helderheid te komen als de kleurenleer van Newton hen gaf. Anderzijds beseffen zij dat de helderheid van Newton's kleurenleer voortkomt uit het schematische, modelmatige karakter ervan. Hieruit kan het besef voortkomen dat dit gevoel van helderheid deels op illusie berust, omdat door de abstracte werkwijze voorbijgegaan wordt aan het wezenlijke karakter van kleuren.

Een andere route start met een fenomenologische bespreking van kleuren, waarna men aangeeft hoe over dezelfde verschijnselen modelmatig kan worden gedacht. Het voordeel van deze volgorde is dat de leerlingen zich door de fenomenologische werkwijze eerst verbinden met de volheid van de kleurfenomenen en dat pas daarna de reductionistische, tot schematische samenhangen terugbrengende werkwijze aan bod komt. Het nadeel is, dat de weg tot helderheid en inzicht een langere en moeizamere is. Veel leerlingen geven dan ook als mening te kennen, dat Goethe's werkwijze met die van Newton gecombineerd zou moeten worden, in de hoop de voordelen van beide vormen van wetenschap te kunnen verenigen.