

2. LICHTLEER

2.1 Kijken en het oog

Het zien en het oogzintuig vormen een goed thema om de periode mee te beginnen. Daarbij kunnen de meer fysieke of technische aspecten van het oogzintuig besproken worden, terwijl op vele punten ook meer filosofisch getinte uitstapjes mogelijk zijn.

Tijdens het kijken is het oog zeer beweeglijk. Fixatie van het oog op een bepaald punt is eerder uitzondering dan regel. Men heeft dit kunnen onderzoeken door de oogbewegingen te registreren van personen die bijvoorbeeld naar een foto kijken. Het blijkt dat we kijkend de vorm van een voorwerp aftasten, niet door netjes langs de contour te bewegen, maar door snelle sprongen tussen karakteristieke punten te maken. Fixeer je doelbewust langdurig en strak op één punt, dan zie je op een gegeven moment haast niets meer. Het is zelfs gebleken dat sommige mensen tot een dusdanige snelle waarneming van een gecompliceerd beeld in staat zijn, dat dit uit zuiver oogpunt van informatieverwerking van licht/donker-punten niet mogelijk lijkt. Blijkbaar kan een mens met het zien van een aantal karakteristieke toe en wordt het geheel van het beeld gepakt op een wijze die we nog niet begrijpen.

Afgezien van het zuivere zien zelf vindt er nog een zekere integratie van de zintuiglijke gewaarwordingen plaats, die leidt tot een voorstellingsbeeld. Vorm en kleur worden afzonderlijk, maar wel interactief opgenomen en op elkaar betrokken, zodat zij versmelten tot één geheel.

De waarneming met onze ogen is sterk intentioneel: men ziet wat men zien kan of wil. Bekend is het verhaal van een Zuidamerikaanse indiaan die door toedoen van een antropoloog voor het eerst een westerse stad zag. Zelfs het wiel was in zijn cultuur onbekend. Op een gegeven moment passeerde een wagen met een lading bananen. Naderhand wist de indiaan te vertellen dat hij een man had zien lopen met een enorme berg bananen op zijn rug!

In een volstrekt duistere ruimte kan men door het aansteken en weer uitblazen van een kaars nagaan wat de reactie van de mens is op licht en donker. De leerlingen kunnen beleven dat we in het licht opgaan, dat men zich bij te veel licht terughoudt en dat men in het donker tot zichzelf komt en overgaat tot een luisterende, meer naar binnen gerichte stemming. Goethe heeft in zijn kleurenleer (eerste afdeling: fysiologische kleuren) heel gedetailleerd over deze fenomenen geschreven.

Aan de werking van een kortstondige lichtflits van bijvoorbeeld een fototoestel kunnen we een hele reeks van waarnemingen doen. Het beeld dat ons verblindt voor het doen van andere waarnemingen ebt maar langzaam weg. Afhankelijk van waar men naar kijkt lijkt het nabeeld groot als men naar een ver weg gelegen of klein als men naar een dichtbij gelegen achtergrond kijkt. Kijkt men naar een witte muur, dan is het verblinde vlak eerst omgeven door een purperen glans en later door een gele. Sluit men de ogen, dan ziet men het beeld in de complementaire kleuren. Het onderzoeken van de werking van deze voor het oog gefixeerde beelden kan ook gedaan worden aan de zogenaamde nabeeld-proeven. Staar een tijdje naar een vorm of een kleurvlak en haal dit vervolgens weg, terwijl men naar een witte achtergrond blijft kijken. Het nabeeld dat men nu ziet is diapositief qua licht/donker en heeft de complementaire kleur. Dit soort proeven vraagt van de klas een flinke concentratie en kan men daarom niet te lang voortzetten. Een prachtig, lang uitklinkend nabeeld kan men 's ochtends krijgen door meteen na het opstaan met gesloten ogen de gordijnen te openen en kortstondig in het ochtendlicht naar buiten te kijken. Nabeeld-kleuren zijn zacht, beweeglijk en lichtend van kleur. In paragraaf 3.4 komt dit onderwerp nog nader aan bod.

Ieder oog neemt zijn eigen beeld waar. Houdt men een potlood tien cm van de neus vandaan terwijl men ver weg kijkt, dan ziet men twee potloden. Door het sluiten van het linkeroog bemerkt men dat men het linkerbeeld met het rechteroog ziet. Probeert men één van beide beelden te pakken, dan grijpt men kijkend door het ene oog mis en door het andere oog raak. Dit geeft een indicatie van wat ons primair actieve oog is. Het feit dat ieder oog zijn eigen beeld ziet, is een voorwaarde voor het zien van diepte. Ook de tegenwoordig populaire driedimensionale posters berusten hierop. Door te staren krijgt ieder oog zijn eigen beeld en ontstaan vorm en ruimte. Ook de rood/groen en de gekruiste polaroidbrillen maken het bij het bekijken van een driedimensionale film mogelijk om twee beelden te zien, waardoor diepte en ruimtelijkheid ontstaan.

Het is ook interessant om allerlei tekeningen, bewegende ovalen of spiralen te bekijken, die het zogenaamde gezichtsbedrog geven. Daarbij kan men steeds ontdekken dat het innemen van slechts één standpunt in de ruimte tot een verkeerde voorstelling of begrip van de waarneming leidt. Er is daarbij dus geen sprake van gezichtsbedrog, maar van "beoordelingsbedrog".

Men kan ook licht/donker- of kleurcontrasten onderzoeken. Een grijze cirkel op een zwarte achtergrond lijkt lichter en groter dan op een witte. Als men een grijs vlak tussen twee kleurvlakken van dezelfde kleur bekijkt, dan is het nabeeld van dit grijs gekleurd.

Een andere reeks fenomenen waarbij het oog betrokken is vormen de kleuren die ontstaan door beweging. Er zijn verschillende zwart/wit schijven in de handel die bij rotatie kleur laten zien. De afwisseling van licht en donker roept dit fenomeen in verschijning.

Nog een ander fenomeen dat in samenhang met het oog zelf optreedt, is dat een licht/donker grens witter en zwarter lijkt op de grensovergang. Dit fenomeen is door Ernst Mach (1838-1916) ontdekt en wordt daarom de machlijnen genoemd.

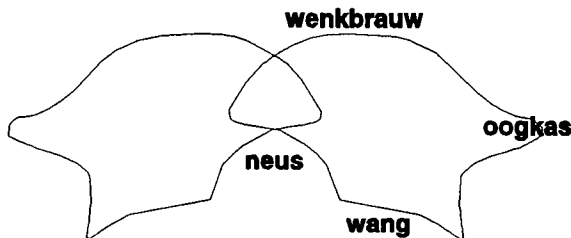
Van grotvissen, die nooit in daglicht hebben geleefd, is bekend dat zij geen ogen hebben. Brengt men zulke vissen langdurig in water met daglicht, dan ontwikkelen zij ter plaatse van de ogen een lichtgevoelige huid, een aanzet tot ogen. Paarden die in mijnen werden gebruikt en altijd ondergronds bleven, werden reeds na een jaar blind. In dit verband maakte Goethe het volgende veel geciteerde gedicht:

"Wär' nicht das Auge sonnenhaft,
Wie könnten wir das Licht erblicken?
Lebt' nicht in uns des Gottes eigene Kraft,
Wie könnt' uns göttliches entzücken?"

Hiermee wilde Goethe aangeven dat het innerlijke licht, dat zich uiterlijk manifesteert aan de zon, dezelfde scheppende kracht is die ook het oog geschapen heeft.

Het oog zelf is een prachtig beeld van de kosmos ten aanzien van de wereld van het licht. De kleuren van de iris staan ingespannen tussen het oogwit en het zwart van de pupil. De iris is echter grenzend aan de pupil lichter en grenzend aan het oogwit donkerder van kleur.

Is men over het oog eenmaal enthousiast in gesprek, dan kunnen zich nog tal van bijzonderheden aansluiten. De blinde vlek kan men 'zien' door op een stuk papier een stip te tekenen en dit op ooghoogte langzaam naar rechts te bewegen. Op een bepaalde plaats ziet men dan de stip niet meer. Het aftasten van het eigen gezichtsveld en dit tekenen is ook een verrassende ontdekkingstocht. Naar onderen toe vormt de wang de grens, dan de neus, de wenkbrauw en de rand van de oogkas (zie onderstaande figuur).



Een verdere uitbreiding vormt het tekenen van de oogbol met lens, oogvocht, netvlies, enz. en het demonstreren van enige proeven, die iets van de verschillende aspecten van het oog laten zien. Vervolgens kan men enige beschouwingen wijden aan het samenwerken van het oog als lichamelijk orgaan en het innerlijk van de mens.

- De lens geeft bij zeer schuin kijken kleureffecten aan de licht/donkergrenzen.
- Het vocht in de oogbol hangt samen met het zien van een schijnsel rond een kaars, de zogenaamde nimbus. Hoe troebeler het oogvocht, des te sterker ziet men het schijnsel.
- Het netvlies is heel ingewikkeld van structuur. Alleen in het centrum kan men goed kleuren zien, de omgeving van het gezichtscentrum geeft alleen licht/donker indrukken. Om dit te kunnen onderzoeken fixeert men door één oog kijkend op een punt, terwijl men een kleurvlak van het centrum van het gezichtsveld uit naar rechts beweegt en een tweede naar links. Na een verschuiving van circa 70° ziet men beide vlakken kleurloos.
- Het zien van de machlijnen, dus het zien van een extra wit en zwart aan weerszijden van een licht/donker-grens, hangt samen met het netvlies. Wordt een gedeelte van het netvlies aangedaan door het kijken naar een licht vlak, dan wordt het netvlies rond de overgang licht/donker aan de donkere kant minder gevoelig dan het overige donkere gebied en aan de lichte kant gevoeliger dan het overige lichte gebied. Hierdoor ontstaat contrastversterking. Dit principe wordt ook gebruikt bij beeldbewerking van onscherpe computerbeelden. Men maakt dan op elke licht/donker-overgang kunstmatige machlijnen.
- Interessant is ook te vermelden dat de stand van het beeld op het netvlies niet bepalend is voor hoe men de wereld ziet. Het oog heeft als camera obscura een puntgespiegeld beeld op het netvlies. Draait men nu met een bijzondere bril links-rechts en/of onder-boven om, dan is men in eerste instantie gedesoriënteerd. Doet men echter moeite te lopen en dingen te betasten, dan is na enige dagen beeld- en tastwereld weer op elkaar afgestemd. Doet men vervolgens de bril weer af, dan is weer enige tijd nodig voordat beeld en tast weer op elkaar afgestemd zijn. De mens is lichamelijk verbonden met de tastwereld en innerlijk met de beeldwereld. Beide moeten op elkaar zijn afgestemd.

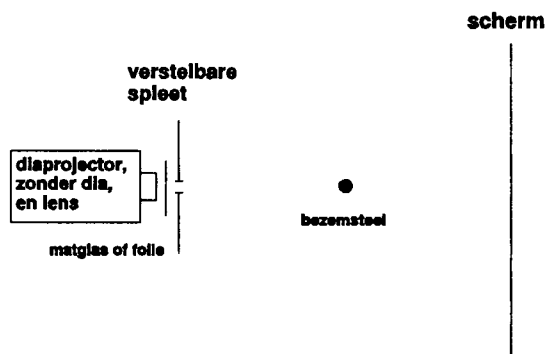
Verschijselen die de mens ziet waarbij het oog zélf betrokken is, zijn net zo objectief, want voor alle mensen min of meer gelijk, als verschijselen die alleen door de buitenwereld bepaald worden. Zulke fenomenen demonstreren dat de mens niet alleen innerlijk, maar ook in de

ruimte als onruimtelijk wezen werkzaam is. Hij komt aan de dingen in de omgeving via de processen in het eigen lichaam tot gewaarwording van die omgeving. Het zintuig kunnen we niet opvatten als een sensor die informatie doorgeeft die in de mens verwerkt wordt. Het lichamelijke systeem van zintuig, zenuwbanen en hersenen maakt het de innerlijk in dit systeem actieve mens mogelijk een aspect van de werkelijkheid tot bewustzijn te brengen. Hiervan kan ook een herinnering bewaard blijven, omdat de mens zowel innerlijk als lichamelijk door waarnemingen verandert.

2.2 Schaduwen en beeldvorming

Wil men het onderwerp schaduwen en beeldvorming in een 12e klas behandelen, dan lijkt dit lastig, omdat dit thema in eerste instantie niet uitnodigt tot iets nieuws. Men kan echter een bijzondere opstelling nemen en deze met de leerlingen analyseren. In tegenstelling hiermee bewandelen we hier de synthetische weg.

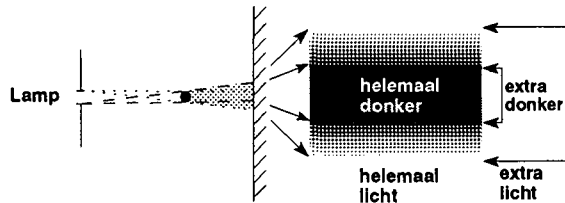
Bekijkt men bij daglicht de schaduw van een lantaarnpaal, dan is deze vlakbij de paal scherp en verderop steeds onscherper. We hebben hier te maken met de factoren zon, paal, grond en ruimte. Willen we dit fenomeen in de klas bestuderen, dan is de volgende opstelling heel bruikbaar:



Bij deze proefopstelling kan men de grootte van de lamp eenvoudig regelen door de spleet te variëren. Het matglas is nodig om kleurvorming aan de randen van de lichtbundel en tevens om beeldvorming van de lamp te voorkomen. Het lichtende matglas wordt nu de lichtbron. We kunnen nu de volgende fenomenen waarnemen:

- Wordt de spleet smaller, dan wordt de schaduw scherper.

- Plaatst men het scherm dicht achter de bezemsteel, dan is de schaduw smal en scherp, plaatst men het scherm verder weg, dan is de schaduw breder en onscherper.
- Binnen de schaduw kan men een kern en twee halfschaduw onderscheiden.
- Bij een flinke halfschaduw ziet men duidelijk de lichte en donkere machlijnen:

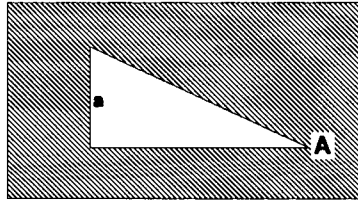


- Verschuift men het linker- of het rechterkarton van de spleet, dan verschuiven twee van de vier grenzen van de schaduw.
- Kijkt men langs het scherm gaande terug naar de lamp, dan ziet men buiten de schaduw de lamp in zijn geheel, in de halfschaduw gedeeltelijk en in de kern helemaal niet. Men kan de leerlingen voorhouden: ik ga begrijpen wat ik op het scherm zie, wanneer ik me voorstel dat ik ter plekke van het scherm terugkijk naar de lamp.
- In de kernschaduw kan men een schijnbaar lichte streep zien wanneer de twee donkere machlijnen dicht bij elkaar liggen.
- Er is een lineair verband tussen de afstanden van lamp tot bezem, van lamp tot scherm en de afmetingen van het schaduwbeeld.
- Maakt men de lamp breder dan de bezemsteel dan zal vanaf een bepaalde afstand van scherm tot bezem de kernschaduw verdwijnen.

De machlijnen hangen samen met het menselijk oog en vormen een verschijnsel dat de mens wel waarneemt, maar wat nog niet tot objectief fenomeen in de buitenwereld is geworden. Zij laten een spanning tussen licht en donker zien die door de menselijke ziel als tendens reeds wordt waargenomen. Het waarnemingstechnische aspect werd reeds in de vorige paragraaf beschreven.

- De kernschaduw met de halfschaduw aan de omtrek laat duidelijk de vorm van het belichte voorwerp zien. Deze vorm is des te duidelijker naarmate het voorwerp dichter bij het scherm staat.
- De halfschaduw hangt samen met de vorm van de lamp. Dit wordt pas goed zichtbaar als men de lamp een herkenbare, bijvoorbeeld

driehoekige vorm geeft. Plaats daartoe in de diaprojector zonder lens een dia met een uitgesneden driehoek. Plak de dia af met mat plakband wanneer men geen matglas gebruikt. Plaats de dia in de eerder aangegeven proefopstelling. De halfschaduw van de bezemsteel zal nu niet meer symmetrisch zijn. Wanneer men van het scherm naar de lamp terug kijkt dan ziet men in de ene halfschaduw slechts punt A van de driehoek en in de andere halfschaduw zijde a.



- Houdt men nu dwars op de bezemsteel bijvoorbeeld een ballpoint, dan ziet men in het schaduwbeeld ter plekke een driehoekige schaduw, die puntgespiegeld is ten opzichte van de driehoek van de lamp.
- Vervolgens kan men met een diafragma of met een stuk zwart karton met ingeprikte gaatjes van het scherm naar de lamp bewegen. Vlakbij het scherm ziet men een duidelijk schaduwbeeld. Naar de lamp toe gaande ziet men de ronde beeldjes van de prikgaatjes veranderen in driehoekjes. Wentelt men het karton nu rond, dan wentelen de driehoekige beeldjes van de schaduw mee, maar de driehoekjes behouden hun oriëntatie.
- Nu kan men een glasplaat met ondoorzichtige stippen van het scherm naar de lamp toe bewegen en vervolgens rondwentelen. Eerst ziet men weer een duidelijk schaduwbeeld. Naar de lamp toe gaand veranderen de ronde schaduwbeeldjes van de stippen in donkere driehoekjes in een lichte omgeving. Dit is het principe van de camera lucida (lichtcamera).
- Deze proeven kan men voortzetten door verschillende vormen voor het matglas te plaatsen, zoals een maanvormige gekleurde vorm of de complementaire ondoorzichtige driehoek uit bovenstaande dia.

Hiermee is de camera obscura en de camera lucida besproken. Men kan nog aansluitend, net als in klas 7 vaak gedaan wordt, een kijkdoos laten zien. Men kan ook in een volledig verduisterd lokaal een klein gaatje in het gordijn maken en hier een matglazen plaat of een stuk kalktekenpapier achter plaatsen. Aansluitend kan men nu iets over het diafragma van een

fototoestel vertellen in verband met belichtingstijd, fotogevoeligheid en scherpte-diepte.

Elk fenomeen leent zich voor een vergelijking met de mens; voor het schaduwfenomeen geldt dit in hoge mate. Als een mens zich sterk laat leiden door de eigen zielestemmingen, wordt in zijn handelen vooral de eigen persoonlijke structuur zichtbaar. Zo is ook de vorm van een schaduw overeenkomstig aan die van een dichtbij het scherm geplaatst voorwerp. Het innerlijk van een mens kan echter ook instrument zijn voor het hogere in de mens, een wereld van hogere wijsheid. Het handelen van deze mens vormt zich dan naar deze innerlijke lichtbron, zoals de schaduw van een dichtbij een lamp staand voorwerp ook naar die lichtbron gevormd is. Deze vergelijking biedt een prachtige gelegenheid om uiteenlopende visies op de mens te bespreken: enerzijds de materialistische opvatting, die stelt dat er alleen uit een mens kan komen wat er in zit, met andere woorden, dat een mens altijd handelt uit eigenbelang; en aan de andere kant de vooral in oosterse religies gehuldigde opvatting, dat volledige onthechting en ik-loos zijn de mens toegankelijk maakt voor de zuivere waarheid. Men kan zich met de leerlingen afvragen of alleen een metamorfose van beide wegen voor de toekomst vruchtbaar zal zijn.

2.3 Kijken in spiegels

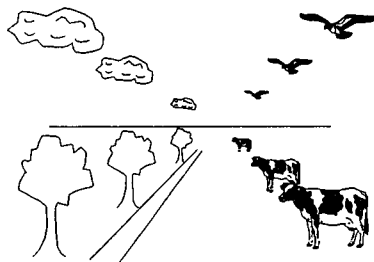
2.3.1 Afstand zien

Als opening van het onderwerp spiegels kan men de leerlingen vragen om eens voor zichzelf na te gaan hoe het komt dat het ene voorwerp als dichtbij ervaren wordt en het andere als veraf. Zo eenvoudig als de vraag lijkt, zo verrassend en vol consequenties is het antwoord. Het maakt in deze veel uit waar men op let. De aardigheid is dat het antwoord gewoon in het dagelijkse leven, tijdens een fietstocht naar school bijvoorbeeld, gevonden kan worden en toch niet triviaal is. Men kan daarbij op verschillende aspecten de aandacht richten. Zo kan je letten op het waargenomen *voorwerp*, op de *omgeving* waarin het voorwerp gezien wordt en op *jezelf* als je naar een bepaald voorwerp kijkt.

Het voorwerp

Voorwerpen op een grotere afstand zien er in de eerste plaats kleiner uit. Hiermee zijn al heel wat misleidende foto's gemaakt. Van de meeste levende wezens kennen we de grootte echter goed en laten we ons niet zo gemakkelijk misleiden. Een ander aspect is dat je van een voor-

werp op grotere afstand *minder detail* en *minder structuur* kunt zien. Van een muur die veraf staat kunnen we de afzonderlijke bakstenen niet meer onderscheiden. Ook is van een voorwerp op grotere afstand de kleur niet meer goed te zien. Alle voorwerpen krijgen min of meer *dezelfde kleur*, neigend naar het blauw. Als je in de bergen niet goed kunt zien welke berg het verst weg gelegen is, dan kan je altijd nog naar het kleurverschil kijken: de meest wittig-blauwe zijn het verst. Tenslotte kan je ook nog zien of je, bijvoorbeeld zonder je hoofd te draaien, een voorwerp goed kunt overzien of dat je misschien maar een deel van het voorwerp in je blikveld kunt krijgen. Sta ik vlak voor een huis dan zie ik bijvoorbeeld alleen de voordeur, ga ik op een grotere afstand staan, dan kan ik in één oogopslag het hele huis overzien.



De omgeving

In de omgeving van het voorwerp kan je ook van alles zien, wat je erop kan brengen om te zeggen dat een voorwerp dichtbij is of veraf. Het is duidelijk dat een koe in het weiland veraf is als ik vóór de koe nog veel gras kan zien. Hetzelfde geldt voor vogels of wolken in de lucht: als je nog veel *voorgond* ziet, dan is het voorwerp ver weg. Hoe dichter een voorwerp bij de horizon staat, hoe verder weg het is. In relatie tot een ander voorwerp is het duidelijk dat voorwerpen die elkaar *afdekken* vóór respectievelijk áchter elkaar staan. Een geheel ander effect is de *parallax*, het verschijnsel dat je voorwerpen die ver weg staan met de beweging van je hoofd ziet meegaan. (Ofwel voorwerpen die dichtbij staan zie je in tegengestelde richting bewegen). Het duidelijkst is dit bij erg ver weg gelegen hemelverschijnselen. Bij een avondwandeling door het bos begeleidt de maan ons gedurende de tocht, terwijl de bomen duidelijk aan ons voorbij gaan. Ook in het klein is dit heel goed waar te nemen. Als je in een gezelschap iemand niet goed kan zien, dan is een kleine zijdelingse hoofdbeweging genoeg om langs de voorste personen te kijken en de achterste te zien. In een tweedimensionaal vlak zoals een schilderij of televisie is dit effect niet aanwezig.

De waarnemer

Als waarnemer kunnen we ook het een en ander aan onszelf bemerken. Zo'n waarneming aan onszelf is soms niet gemakkelijk te maken, maar na enige oefening is dit voor iedereen te doen. Je kan aan je ogen merken dat de *oog lens scherpgesteld* moet worden. Kijk je eerst naar een voorwerp, net buiten het nabijheidspunt en daarna naar een veel verder gelegen voorwerp, dan voel je iets in je oog gebeuren. Dit scherpstellen gaat geheel "automatisch", maar het is wel waarneembaar. Soms is ook nog waarneembaar dat de ogen enigszins *naar elkaar toe draaien*, om een dichtbijgelegen voorwerp met de kijkrichtingen "te pakken". Dat is alleen in extreme gevallen merkbaar. Wanneer je naar een veraf gelegen voorwerp kijkt, merk je dat je ogen *samenknijpt* en gaat turen.

2.3.2 Tasten en zien

Een belangrijk begrippenpaar in dit verband ontstaat door het onderscheid in tastvoorwerpen en beeldvoorwerpen. De meeste voorwerpen kunnen we zien en daarbij ook betasten. Gelukkig wordt in de meeste gevallen de ene waarneming door de andere ondersteund. Een steen in het landschap kan je gewoon zien en we zijn niet verbaasd als we hem daarna ook gewoon van dezelfde plaats kunnen oppakken. De steen als beeldvoorwerp en de steen als tastvoorwerp vallen samen. Er zijn in de natuur en in de techniek ook zuivere beeld- en tastvoorwerpen. De hemelverschijnselen moeten we vooralsnog als beeldvoorwerpen beschouwen. De regenboog en andere halo-verschijnselen zijn zuiver beeldvoorwerpen. Denk ook aan lichtverschijnselen als een nimbus om een kaarsvlam en het noorderlicht. Later zullen we andere voorbeelden van beeldvoorwerpen tegenkomen. Zuivere tastvoorwerpen zijn niet zo gemakkelijk te vinden. Deze zijn meestal ook zichtbaar. Het onderscheid wordt duidelijk als we denken aan een vis die van boven het wateroppervlak gezien wordt. Daar valt de "tast-vis" niet samen met de "beeld-vis".

2.3.3 De vlakke spiegel

Kijk naar een tafel die voor het raam staat. Dan zie je dat de lichte buitenwereld die door de ruit te zien is ook de tafel helder verlicht. Is de tafel glimmend gepoetst dan is er nog meer te zien. Bijvoorbeeld of het gordijn open is of bijna dicht. Hoe gladder de tafel, hoe meer details zichtbaar worden. Bijvoorbeeld eerst de raamstijlen en daarna zelfs details van de wereld buiten. De tafel is dan glimmend als een spiegel. Het

verschijnsel spiegelen doet zich niet alleen bij dit soort echt gladde oppervlakken voor, maar bijna bij *alle voorwerpen*. Je hoeft maar je vlakke hand schuin in de richting van een lamp te houden, of je bemerkt al het schijnsel van de lamp op je huid. Tegelijkertijd is ook waar te nemen dat er van het spiegellende voorwerp, je hand, steeds minder te zien is. Je kan de kleur niet meer zien, de oppervlaktestructuur wordt ook onzichtbaar. Hoe beter een voorwerp spiegelt, hoe meer er van de omgeving te zien is en hoe minder van het voorwerp zelf. Het spiegellende voorwerp "offert zijn zichtbaarheid op" ten gunste van de zichtbaarheid van de omgeving. Een goede spiegel kan je niet zien, meestal zijn er randen aan een spiegel waaraan we kunnen zien waar deze ophoudt of begint. In winkels zijn er wel eens wanden die geheel uit spiegels bestaan en daar kan men aardig de suggestie beleven, dat de winkel als beeld veel groter is dan afgetast kan worden.

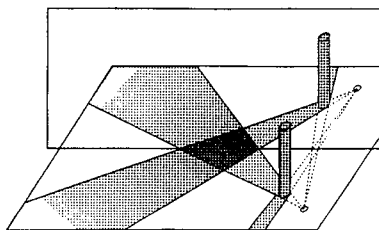
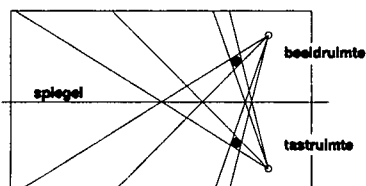
In vervolg op de verkennende bespreking kan iets genoemd worden wat door de leerlingen direct herkend zal worden, namelijk de manier waarop sommige leerlingen hun periodeschrift maken. Een enkele keer kom je wel eens tegen dat een leerling alles, maar dan ook alles zoals het door de leerkracht uitgesproken is of op het bord geschreven is, perfect in zijn/haar schrift weergeeft. Het hoeft niet, maar het kan zijn dat de leerling er dan zelf niets mee gedaan heeft. Dat zou je spiegelen kunnen noemen. Sommige mensen kunnen dat heel goed, sommigen kunnen zelfs niet anders.

Als je in een spiegel kijkt, dan werp je een blik op een wereld die gevuld is met zuivere "beeldvoorwerpen". Het vlak van de spiegel kan je oneindig uitgebreid denken en is de grens van die "spiegelwereld". In de spiegel zien we een halfwereld van zuivere zichtvoorwerpen. Het is net als kijken door een venster, je kan een hele wereld zien, maar je kan er niets in aanraken. Een leuke vraag om een gesprek op te roepen is de volgende. "Ik heb een grote spiegel en daarnaast een heel kleintje. In welk van de twee kan je het meest van de omgeving zien?" De vergelijking met het kijken door een sleutelgat kan de oplossing bieden. Als je door een sleutelgat de geheimen van het achterliggende vertrek wilt ontwaarselen, dan moet je niet op een afstandje blijven staan, maar je oog zo dicht mogelijk bij het gat brengen. Dit is ook zo bij het kijken in een kleine spiegel. Hieraan verwant is de volgende situatie. Twee personen A en B staan voor een spiegel. A kijkt naar het beeld van B in de spiegel. "Welk deel van de spiegel is nu minimaal bij dit proces betrokken?"

Een ander interessant gesprek met de leerlingen kan ingeleid worden met de vraag of je de beelden in de spiegel nu *in* de spiegel, *op* het spiegeloppervlak of *achter* de spiegel ziet. Een hulp daarbij is natuur-

lijk hetgeen hierboven besproken is over het zichtbaar worden van afstanden. Met name het verschijnsel van parallax is een sleutel. Bij twijfel kan je een proef doen waarbij een leerling vóór de spiegel staat en een ander er achter. Als de spiegel op de grond staat dan is het zo in te richten dat je in de spiegel bijvoorbeeld alleen de benen ziet van de eerste leerling. Hoe moet nu de tweede gaan staan zodat het voor alle leerlingen in het lokaal lijkt alsof de tweede leerling zonder sprongsgewijze overgang de spiegelbeeld-benen van de andere heeft?

Vervolgens komen we tot de eerste regel betreffende het spiegelen: "Van elk voorwerp vóór de spiegel is een beeld te vinden áchter de spiegel, zodat de afstanden van het voorwerp en van het beeld tot het spiegeloppervlak even groot zijn."



Net als in onze gewone wereld kunnen we de gespiegelde voorwerpen indelen in *lichtgevers* en *schaduwgevers*. Dat kan mooi getoond worden met de volgende proef.* Op een tafel, mooi gedekt met een wit tafellaken, staat een kaars op een standaard en een kartonnen schaduwgever. Op de rand van de tafel staat, loodrecht op de tafel, een vlakke spiegel. In de spiegel is dan een scene te zien, die samen met de scene op de tafel de moeite van het tekenen waard is. De kaars, zowel als de schaduwgever en het tafellaken, zijn in de spiegel terug te vinden. Aan deze proef kunnen we direct de tweede spiegelwet ontdekken: "Spiegelbeeld-lichtbronnen werken net als echte lichtbronnen en de spiegelbeeld-schaduwgevers als echte schaduwgevers."

Grenzen van licht- en duisterruimtes laten zich heel precies tekenen. Een aanzicht zoals je dat schuin van boven kan zien is belangwekkend maar tegelijk moeilijk goed te tekenen. Een schematische tekening waarin we de tafel van boven bekijken, de spiegel tekenen als een lijn op de tafel en de voorwerpen als een klein rondje helpt enorm. De plaats van de spiegelbeeld-voorwerpen kan gevonden worden met de bovenbeschre-

* Zie *Entwurf einer Optik* van F. Julius.

ven regels. In het bijzonder kan men goed zien dat het perspectief, dat in de gewone wereld aanwezig is, in de spiegelbeeldwereld gewoon, zonder onderbreking, doorloopt.

Een zeer levendige discussie kan op gang gebracht worden door de leerlingen de volgende zeer verwarrende vraag te stellen. "Jullie weten dat een spiegel links en rechts verwisselt. Als je voor de spiegel je haar naar links wilt kammen dan moet je dat zo doen dat je spiegelbeeld dat naar rechts kamt. Maar een spiegel is in de links-rechts richting net zo homogeen als in de onder-boven richting, waarom verwisselt de spiegel dan niet onder en boven?"

Met andere woorden: een spiegel die rechts en links verwisselt zou, 90° gekanteld, onder en boven moeten verwisselen. Nog anders gezegd: stel dat ik voor een spiegel sta en ik wil mijn spiegelbeeld de hand schudden, dan kan ik mijn hand uitstrekken en de spiegelbeeld-persoon doet dat dan ook. Ofschoon we niet bij elkaar kunnen komen zie je aankomen dat de spiegelbeeld-persoon niet met een rechterhand maar met een linkerhand aankomt. Norbert (9 jaar), zijn haar borstelend: *"Eigenlijk klopt een spiegel niet. Want, kijk (borstelt op de rechterkant van zijn hoofd) als ik hier rechts borstel, dan doet hij het links. Eigenlijk zou hij nu hier moeten komen"* (wijst op de linkerkant van zijn hoofd).

Na enig nadenken komen de leerlingen er vaak achter wat er nu eigenlijk aan de hand is. Het is niet het gebeuren wat erg verwarrend is, maar de vraagstelling zet de denkers op het verkeerde been. Na zo'n discussie kan een gesprek over manipulatie door wetenschappers, journalisten, schrijvers, overheid en leraren door een bepaalde manier van spreken plaatsvinden. Het is niet zo dat links en rechts verwisseld worden. Als je toch van verwisselen wilt spreken, dan kan je zeggen dat voor en achter verwisseld worden. Heel goed valt dit te illustreren door een rechterhuishoudhandschoen aan te trekken en deze dan zo van de hand af te stropen dat de vingers het langst blijven zitten. De vingers van de uitgestoken rechterhand zijn het dichtst bij de spiegel en de pols het verst. Als je de handschoen afstroopt dan komt de spiegelbeeld-pols het verst achter het spiegel oppervlak en de spiegelbeeld-vingers het dichtst bij het spiegeloppervlak, geheel in overeenstemming met de eerste spiegelwet. De afgestroopte handschoen is dan een linkerhandschoen geworden. Net zoals alle voorwerpen die, zoals men zegt, geen spiegelsymmetrie hebben. Als je in de spiegel kijkt, dan zie je geen echt gezicht, maar alleen de allerbuitenste laag van je eigen gezicht die, als een masker van je gezicht afgepeld, achter de spiegel te zien is.

2.3.4 Niet-vlakke spiegels

Het eerste wat je kan ervaren als je naar een niet-vlak spiegelend oppervlak kijkt, is verbazing over de vreemde beelden. In een golvend wateroppervlak herkennen we mogelijk nog enige kleuren van de gespiegelde voorwerpen, maar als je alleen naar de spiegelbeelden kijkt, dan is de vorm niet te achterhalen. Als de golfjes nu maar even stilstonden, dan zou het misschien wat worden, maar het beeld dat we zien in een golvend wateroppervlak is zo speels, dat de vorm van het beeld goed verborgen blijft.

De bolle spiegel

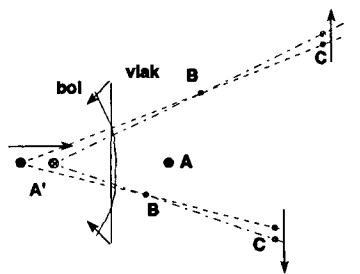
Een spiegelsituatie aan een eenvoudig gekromd oppervlak is een stuk overzichtelijker. De meeste mensen hebben uit hun ervaring een goed beeld van wat er in een kerstboombal te zien is. Het is echter toch vaak verrassend om nog eens zo'n kerstbal door te geven en erop te wijzen, hoe klein de figuurtjes zijn die je daarin kan zien. Ook is van belang dat er in zo'n bolle spiegel meer te zien is van de omgeving dan in een vlakke spiegel, zonder dat je er dichtbij hoeft te komen. Van deze eigenschap wordt gebruik gemaakt bij spiegelbollen, die je in supermarkten kunt zien hangen. Vanuit één zitplaats kan de caissière de gehele winkel, in miniatuur, in de gaten houden. Hier bemerken we een omgekeerde beweging: hoe kleiner de beeldjes, hoe meer je kan zien. Zie je de wereld in een bolle spiegel nu beter omdat je een groter overzicht kunt krijgen of zie je de wereld nu minder goed omdat alle voorwerpen kleiner afgebeeld worden?

Bijzonder interessant is het antwoord op de vraag naar de plaats van die beeldjes. Vrijwel alle leerlingen gaan ervan uit dat de beeldjes klein zijn en dus ver weg. Van alle vormen van op afstand zien is deze manier het meest dominant.

Met de vervormbare spiegel* is een goed inzicht te verkrijgen in de eigenschappen van een hol of bol spiegelend oppervlak. Een eerste kennismaking met deze spiegel, als hij nog vlak is, geeft vaak nogal wat hilariteit. Alle leerlingen zijn na het spannen van het spiegelfolie verrast bij het ineens zien van elkaar. Allereerst kan men naar willekeur vervormen en de leerlingen laten raden (of weten ze het?) wat je doet, hol of bol maken. Als de spiegel dan bol geblazen wordt, kan het onderzoek naar de plaats van de verkleinde beelden starten. Het is mogelijk om eenzelfde

* Zie voor het maken van zo'n spiegel *Optikunterricht* van v. Mackensen

opstelling te maken met twee personen, de één voor en de ander achter de spiegel, net als hierboven geschetst bij het bepalen van de plaats van een beeld achter de vlakke spiegel. Dit kan wel eens niet volledig overtuigend zijn. Een andere methode is de volgende. Plaats middenvoor de spiegel in vlakke toestand een statief A met alleen de verticale staaf.



Als de spiegel van vlak naar bol verandert dan moeten de statieven C in de aangegeven richting verplaatst worden

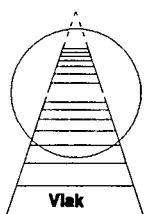
Laat nu de leerlingen links en rechts van het midden nog een tweetal B en C van zulke statieven neerzetten, zó dat ze steeds met het spiegelbeeld van statief A een uitgelijnd drietal verticale lijnen vormen. Dat kan tegelijk aan de linkerkant en aan de rechterkant van de spiegel gebeuren. Hierbij kun je dan herinneren aan de landmeetpraktijk, waar regelmatig drie jalons op één lijn gezet moesten worden. Als nu de spiegel bol gemaakt wordt, dan zal er iets aan de uitgelijnde statieven moeten veranderen om ze weer met het spiegelbeeldstatief uit te lijnen. Een schetsje van de situatie van bovenaf gezien zal duidelijk maken dat het beeld, ofschoon kleiner geworden, toch dichterbij achter de spiegel is gekomen.

De holle spiegel

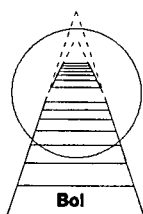
Direct aansluitend op de hierboven beschreven proef kan men doorgaan met de holle spiegel. Men kan dan de spiegel hol maken en met behulp van dezelfde proefopstelling ontdekken, dat het beeld bij het hol zuigen zich van de spiegel verwijderd. Tegelijk is het duidelijk dat de beelden groter worden, terwijl je minder van de omgeving ziet. De vraag of je de voorwerpen nu beter kunt zien is hier niet louter spel. Je ziet de beelden van de leerlingen beter omdat ze zich groter aan je voordoen en je ze op deze manier meer in detail kunt bestuderen, maar je ziet ze slechter omdat je de beelden niet meer in hun (klasse-)verband kunt zien. Deze vraag kan nog eens terugkomen bij het kijken door vergrootglazen, telescopen en microscopen (zie paragraaf 2.4, laatste alinea). Is het niet een algemene tendens om de details, zowel van de microwereld (scheikunde, biologie, kern- en atoomfysica) als van de macrowereld (astronomie), sterk uit te vergroten, terwijl de verschijnselen tegelijkertijd steeds minder makkelijk in een ecologisch, holistisch verband gezien kunnen worden? Door de wereld door een verkleinglas te bekijken worden de relaties met de omgeving misschien gemakkelijker zichtbaar. Stof genoeg voor een pittig gesprek over wetenschap en het menselijk doen en laten.

2.3.5 Perspectief zien in een (niet-vlakke) spiegel

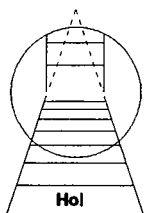
Als er besproken is dat de beelden groter of kleiner worden en van plaats veranderen ten opzichte van hetgeen je kunt zien in een vlakke spiegel, dan hebben we een goede basis, maar over de vervorming van de beelden is dan nog niets gezegd. Een proef die hieromtrent inzicht geeft is de volgende. Hang voor het hart van een spiegel een ladder, precies in de richting van de normaal op het oppervlak. Kijk nu naar de ladder en zijn spiegelbeeld vanaf een afstandje en een beetje van boven. Omdat de meeste ladders niet recht zijn, is het dus het beste om van latjes een geïdealiseerde ladder te maken. Zolang de spiegel vlak is en de ladder recht hangt, zie je nauwelijks verschil tussen de echte ladder en zijn spiegelbeeld. Het is goed te zien dat het perspectief van de ladder in de spiegelbeeld-ladder gewoon doorgaat. De stijlen lopen door als rechte lijnen naar één en hetzelfde verdwijnpunt. De sporten van de echte ladder lijken in ons schuin-bovenaanzicht steeds dichter bij elkaar te komen en dat zet zich in de spiegel gewoon voort. Ook hier geldt dat als je zuiver wilt waarnemen het een goed idee is om tekeningen te maken van hetgeen te zien is.



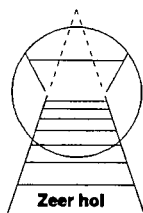
Vlak



Bol



Hol



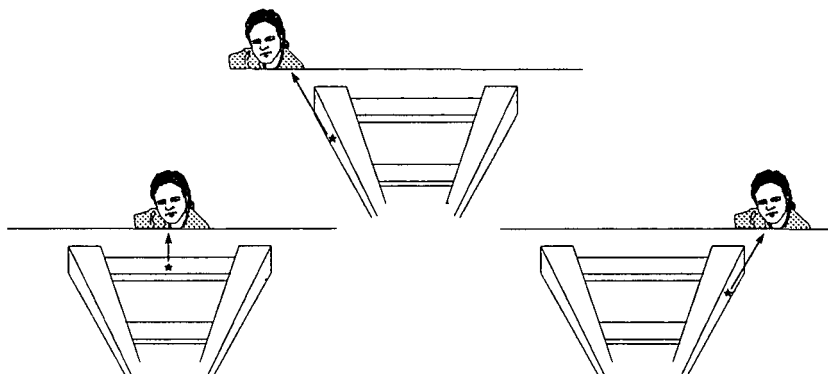
Zeer hol

De tekening van de spiegel in de meest holle stand is niet alleen sterk vereenvoudigd, maar ook niet geheel juist. Oftewel in de echte spiegel valt nog veel meer te zien. Dat het perspectief in een holle spiegel compleet verdwijnt, is experimenteel gemakkelijk te verkrijgen. Ook de omkering van het perspectief is snel te zien. Maar het kan ook gebeuren dat het deel van de ladder dat het verst van de spiegel af staat, nadat het eerst uit het beeld verdwenen is, omgekeerd terug in beeld komt. Dat is alleen vaak moeilijk te zien. Maar een gekleurd voorwerp op het einde

van de ene ladderstijl kan wel min of meer teruggevonden worden in het tegenoverliggende kwadrant van de spiegel.

Hoe zit het nu met het waarnemen van het perspectief van de spiegelbeeld-ladder? Als je met je neus bovenop de stijl van een echte ladder staat, lijkt de eerste sport zeer groot en de verste relatief erg klein. Dat wil zeggen, je ervaart op dat moment het sterkste perspectief. Als je met je hoofd verder weg gaat, dan wordt het verschil tussen de lengte van de sporten steeds minder. Als je met je hoofd oneindig ver weg bent, is er geen afstandsverschil meer tussen de dichtstbijzijnde sport en de meest veraf gelegene. Het perspectief is dan geheel verdwenen. Tegelijk zou de ladder in zijn geheel onzichtbaar klein geworden zijn, maar het ligt aan de eigenaardigheden van spiegelbeelden dat het beeld zo verandert, dat het is alsof je het vanuit het oneindige bekijkt (figuur Hol), terwijl tegelijk het spiegelbeeld groot blijft.

Als we concluderen dat je als waarnemer naar het oneindige moet gaan om het perspectief geheel te zien verdwijnen, waar moet je dan naar toe gaan om een omgekeerd perspectief te zien? Over-oneindig ver? Hier is het moment om te herinneren aan één van de manieren om te bekijken of iets ver weg dan wel dichtbij is. Als je je hoofd beweegt, gaat hetgeen ver weg is met je hoofd mee. Dat gaat beter naarmate dat voorwerp verder weg is. Een oneindig ver verwijderd voorwerp, bijvoorbeeld de maan, beweegt geheel met je hoofd mee. Een voorwerp dat bij bewegen met het hoofd méér mee gaat dan bijvoorbeeld de horizon, moet vélder dan oneindig ver zijn. Laten we de zaak eens bekijken vanuit een standpunt gelegen op de ladder zelf.*



* Veel vraagstukken in de optica worden duidelijk als men de kijkrichting omkeert. De verlichtingssterkte van een beschadwd scherm wordt vaak begrijpelijker, als je vanuit het scherm naar alle mogelijke lichtbronnen kijkt.

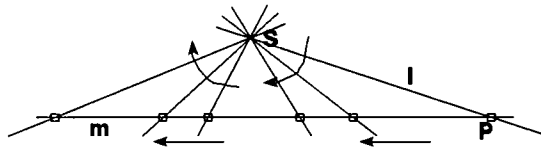
Als je nu vanuit de linkerkant van de spiegelbeeld-ladder naar de waarnemer kijkt, terwijl deze de ladder ziet in omgekeerd perspectief, dan kun je, als je over de ladder naar de andere kant loopt, de waarnemer steeds goed in het oog houden. Hij gaat meer met je hoofd mee dan een voorwerp in het oneindige. De waarnemer moet dus inderdaad over-oneindig ver weg zijn. Het is natuurlijk niet zo dat je kijkend naar een spiegel die hol gezogen wordt, zelf door het oneindige gaat, maar het beeld van de ladder dat je in de spiegel ziet, moet door het oneindige heen gaan!

De gang van het beeld door het oneindige

Het spreken over beelden of waarnemers in het oneindige of zelfs over-oneindige mag misschien wat eigenaardig lijken, toch is daar een duidelijke verbinding mee te krijgen. Hiertoe kan men het volgende experiment doen. Plaats in een verduisterd lokaal voor de spiegel een lichtend voorwerp, bijvoorbeeld een kaars in een standaard. De vlam moet zo goed mogelijk op de hoofdas van de spiegel staan, circa twee meter vóór de spiegel. De leerlingen staan zo ongeveer allemaal achter in het lokaal en proberen allen het beeld goed te volgen.

Neem als uitgangssituatie een spiegel die maximaal bol is. Het beeld van de kaars is dan dicht achter het spiegeloppervlak te vinden. Wordt de spiegel meer en meer vlak, dan gaat het spiegelbeeld verder naar achteren en wordt groter. Als nu de spiegel geheel vlak is, dan is het spiegelbeeld net zo groot als het voorwerp en ook circa twee meter achter het spiegeloppervlak. Daarna wordt de spiegel hol en zet zich het achteruitgaan van het beeld steeds verder voort, terwijl het steeds groter wordt. Er komt een moment waarop het beeld spiegelvullend (oneindig) groot is, het is dan echter tegelijk oneindig ver weg. Mogelijk kan men in deze situatie merken dat ongeaccomodeerd gekeken moet worden. Als de spiegel daarna nog holler wordt dan valt er een tijdje niets in de spiegel te zien dan wat vage lichtschijnselen. Het beeld van de kaarsvlam bevindt zich dan achter de hoofden van de leerlingen en is vanuit hun standplaats dus niet waarneembaar. Op een gegeven moment is er dan wel iets te zien op de gezichten van de waarnemende leerlingen achter in het lokaal. Hun gezichten worden ineens sterker belicht dan daarvoor. Wordt de spiegel dan nog holler dan zien de leerlingen het beeld van de kaarsvlam weer terug. Nu echter omgekeerd! Het beeld ziet men nu vóór de spiegel en is reëel opvangbaar op een scherm. Wordt de spiegel nu nóg holler, dan vervolgt het beeld zijn weg in dezelfde richting, dat wil zeggen naar het spiegelende oppervlak toe. Bovendien wordt het kleiner. Als het op de plaats van de echte kaars is aangekomen dan is het zo ongeveer net zo groot als het origineel zelf.

Het beeld volgt dus een continue weg langs de hoofdas van de spiegel. Het wordt eerst groter totdat het oneindig ver weg is en komt dan, kleiner wordend, terug. Daarbij is het in twee opzichten veranderd, het is omgekeerd en tot een reëel beeld geworden. Dit doet ons natuurlijk direct denken aan de projectieve meetkunde. Hierbij hebben we de gang door het oneindige van een snijpunt (P) van twee lijnen (l en m) bestudeerd. Als de lijn l een continue draaiing om het punt S maakt, dan doorloopt het snijpunt P de lijn m en komt dan door het oneindige terug. Het is dan in zoverre veranderd dat het aan de andere kant ligt van het draaipunt S.



Het blijkt in de praktijk erg moeilijk om een goed beeld te krijgen. Het is toch van belang dat de leerlingen ook aan een spiegel ervaren wat een reëel beeld is. Daarom is het hier goed op zijn plaats om met een vaste holle spiegel een goed reëel beeld te vormen en op een scherm op te vangen.

2.3.6 De spiegelwet

De spiegelwet is een (benaderende) formule voor de plaats van het beeld gezien in een holle, bolle of vlakke spiegel. Deze afstand wordt beeldafstand b genoemd en wordt negatief gerekend als het beeld achter de spiegel is (virtueel) en positief als het beeld voor de spiegel te vinden is (reëel). De spiegel wordt opgevat als een deel van een geheel spiegelen-de bol met straal r . Het beeld van een voorwerp op oneindig grote afstand wordt gevormd in het brandpunt F . Dat punt ligt bij benadering op de hoofdas, halverwege het middelpunt van de bol en het oppervlak van de spiegel. De afstand van het brandpunt tot de spiegel is de brandpuntsafstand f (waarvoor dus bij benadering geldt: $f = \frac{1}{2} r$); de afstand van het voorwerp tot de spiegel wordt voorwerpafstand v genoemd. Bij bolle spiegels rekenen we de brandpuntsafstand negatief, bij holle spiegels positief. De voorwerpafstand v is natuurlijk altijd positief.

De spiegelwet heeft de vorm:* $\frac{1}{f} = \frac{1}{b} + \frac{1}{v}$ Daarbij kunnen we spreken van de grootte van het beeld met behulp van het begrip "vergroting"

(verkleining): $V = \left| \frac{b}{v} \right|$

Voor de volgende berekeningen gaan we uit van een situatie waarin we bij een vaste voorwerpafstand $v=2$ (alle maten bijvoorbeeld in decimeters) de brandpuntsafstand veranderen van $f=-3$ (bolle spiegel) via $f=6$ (weinig hol) tot $f=1$ (zéér hol). De getallen zijn zo gekozen dat de berekening eenvoudig verloopt.

geval 1:	$v = 2$	$f = -3$	$b = -1,2$	$V = 0,6$
2:	2	∞	-2	1
3:	2	6	-3	1,5
4:	2	4	-4	2
5:	2	2	∞	∞
6:	2	1,5	6	0,6
7:	2	1	2	1

Geval 1:

$f=-3$ en $v=2$

$$\frac{1}{-3} = \frac{1}{b} + \frac{1}{2} \rightarrow \frac{1}{b} = -\frac{3}{6} - \frac{2}{6} = -\frac{5}{6} \rightarrow b = -1,2$$

$$V = \left| \frac{b}{v} \right| \rightarrow V = \left| \frac{-1,2}{2} \right| = 0,6$$

Er ontstaat een verkleind, virtueel beeld, dichterbij de spiegel dan wanneer hij vlak zou zijn geweest.

Geval 2:

$f=\infty$ (vlakke spiegel) en $v=2$

Nu is er een even groot, virtueel beeld, even ver achter de spiegel als het voorwerp ervóór.

* De afleiding van deze wet is niet erg ingewikkeld en is in elk tekstboek over spiegels te vinden.

Geval 3:

$$f=6 \text{ en } v=2$$

Het beeld is nu vergroot, nog steeds virtueel, verder achter de spiegel dan wanneer hij vlak zou zijn geweest.

Geval 4:

$$f=4 \text{ en } v=2$$

Het beeld gaat verder weg en wordt groter!

Geval 5:

$$f=2 \text{ en } v=2$$

Het voorwerp staat nu in het brandpunt maar het beeld is oneindig ver weg en daarbij ook nog oneindig groot geworden!

Geval 6:

$$f=1,5 \text{ en } v=2$$

Het beeld is nu gelukkig weer van redelijke grootte, maar bevindt zich nu vóór de spiegel! Bovendien is het beeld reëel en dus opvangbaar op een scherm.

Geval 7:

$$f=1 \text{ en } v=2$$

Beeld en voorwerp bevinden zich nu even ver van de spiegel, precies in het middelpunt van de bol waarvan de spiegel een deel is. Bovendien zijn ze even groot.

2.3.7 Practicum spiegels

Hieronder zijn een aantal opdrachtenbladen weergegeven die samen met elkaar een "stationspracticum" spiegels vormen. Het is de bedoeling dat de leerlingen van proef naar proef gaan, volgens een al dan niet voor hen uitgestippeld pad. Al doende leren ze de spiegelwetten en de eigenaardigheden van spiegelbeelden nog eens kennen. Voor elke proef is steeds aangegeven wat er met de genoemde benodigdheden bedoeld wordt.

1. "De noodspiegel"

Een "noodspiegel" is een hulpmiddel dat gebruikt kan worden om naar een vliegtuig een lichtsignaal te sturen. Het hoort standaard bij een (luchtmacht)pilotenuitrusting. Als deze hun vliegtuig moeten verlaten, dan zijn ze nadien vaak moeilijk terug te vinden. Als ze nu het zonlicht naar het reddende vliegtuig kunnen terugkaatsen, dan zijn ze als lichtpuntje in

het landschap goed te zien. Het spiegeltje bestaat uit een aan beide zijden spiegelend metalen plaatje, met in het midden een klein gaatje. De kunst is om het teruggekaatste lichtvlekje precies op de redders te laten vallen, terwijl je op zo'n grote afstand helemaal niet kan zien of je dat goed doet.

Doel van de proef:

De bedoeling van dit proefje is om uit een gebruiksaanwijzing van dit eenvoudige instrument de exacte werking te begrijpen met behulp van de spiegelwetten.

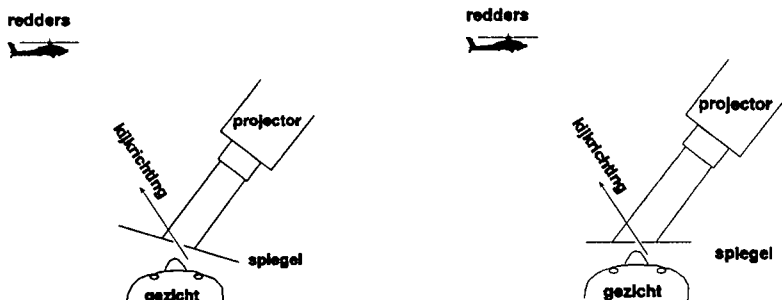
Benodigdheden:

1. een noodspiegel, dit is een dubbelzijdige spiegel met een kleine opening in het midden,
2. een heldere lichtbron (diaprojector of de zon),
3. een waarnemer op afstand.

Opstelling:

1. Ga met de noodspiegel in de bundel (het zonlicht) staan en probeer een lichtbundeltje te reflecteren op een waarnemer die minstens op ca 6 m afstand staat, buiten liever verder weg.
2. Lees de volgende gebruiksaanwijzing:
"Hou de spiegel vlak voor je gezicht en kijk met één oog door het gaatje van de spiegel naar de waarnemer. In de achterzijde van de spiegel zie je nu je eigen gezicht, met daarop een lichtvlekje, de lichtval door het kijkgat. Draai nu de noodspiegel zo, dat je door het kijkgat de waarnemer blijft zien en dat het lichtvlekje op het "spiegelbeeldgezicht" precies in het kijkgat verdwijnt. De waarnemer ziet dan de lichtbron exact gereflecteerd."
3. Voer deze spiegeling een aantal malen uit; probeer signalen te geven. (s.o.s. = ... - - - ...)
4. In de linkerfiguur hieronder is, in bovenaanzicht, de bron, de spiegel en het gezicht van de waarnemer gegeven. Teken in deze figuur achtereenvolgens:
 - a. de zichtlijnen van je rechteroog naar de waarnemer;
 - b. de lichtvlek op het gezicht;
 - c. het gespiegelde gezicht met de lichtvlek;
 - d. de gereflecteerde bundel.Als het goed is bemerk je dat in deze situatie niet voldaan is aan de voorwaarden van de handleiding en dat de gereflecteerde bundel ook niet op de waarnemer komt.
5. In de rechterfiguur hieronder is nu de spiegel gedraaid. Voer nu ook in deze figuur punt a, b, c, en d van opdracht 4 uit.

In deze tweede tekening kan je nu bemerken dat wel voldaan is aan de voorwaarden van de handleiding en dat de gereflecteerde bundel juist op de waarnemer komt.



2. "De magische kijker"

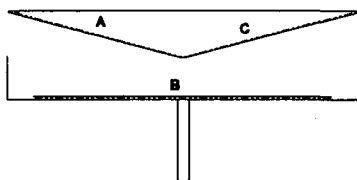
In de volgende opdracht wordt een "magische kijker" bestudeerd. Dit is een houten koker waarin zich drie spiegeltjes bevinden. Men kijkt door de koker en de spiegels A, B en C zijn zo gemonteerd, dat men eerst via spiegel A kijkt. Vervolgens wordt de blikrichting naar B en dan naar C gespiegeld. Het netto resultaat is dat alles achter de koker ondersteboven wordt gezien.

Benodigdheden:

Magische kijker op statief.

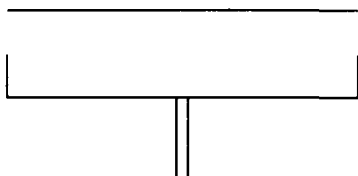
Opstelling:

Zet de kijker zo neer dat je een "buiten scène" kan zien en zelf niet te dicht bij de kijker staat.

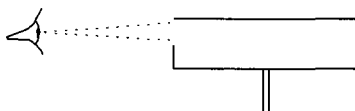


Vragen en opdrachten:

1. Beschrijf in een paar zinnen wat je door de kijker ziet.
2. Bestudeer de koker van nabij. Teken in de figuur hiernaast hoe je denkt dat de kijker in elkaar zit. Kom je er niet uit, vraag dan om hulp.



3. Teken in de derde figuur het vervolg van de twee getekende zichtlijnen die van het oog uitgaan.



4. Kan je zelf een situatie beschrijven waarin de kijker van praktisch nut kan zijn?

3. "De reflector"

In de volgende opdrachten maakt de leerling kennis met een reflector. Een model van een reflector is gemakkelijk zelf te maken door twee spiegeltegels (doe het zelf winkel) diagonaal door te snijden en drie van de verkregen driehoeken met de rechthoekszijden loodrecht aan elkaar te kitten. Om nu in die reflector iets leuks te maken kan je een aantal torusvormige ringen dwars en in de lengte doorsnijden en beschilderen.

Doel van de proef:

Inzicht krijgen in een technische toepassing van het herhaald spiegelen.

Benodigdheden:

Model van een reflector (drie loodrecht verlijmdespiegeldriehoeken), zaklantaarn, doosje met halve en kwart ringen.

Opstelling:

Leg het model zo voor je op tafel dat je erin kan kijken.

Vragen en opdrachten:

1. Kijk recht in de reflector en beschrijf in een paar zinnen wat je ziet.
2. Draai je hoofd totdat je scheef in de reflector kijkt, beweeg je hoofd ook naar links en rechts, Beschrijf wat je ziet.
3. Laat een helper de reflector vast houden en schijn met de zaklantaarn van enige afstand in de reflector. Verplaats jezelf terwijl de reflector vast blijft of draai de reflector terwijl jezelf met de zaklantaarn stil blijft staan. Wat neem je waar aan de gereflecteerde bundel?
4. Bedenk en teken hoe je nu een ruimtelijk voorwerp kunt maken dat in alle richtingen steeds naar de bron toe reflecteert.
5. Leg de reflector weer op tafel en probeer door op de onderste spiegel enige halve en kwart ringen te leggen een ketting te krijgen die deels uit reële en deels uit spiegelbeeld schakels bestaat. Maak hiervan een goed verzorgde tekening in je schrift.

4. "Het spiegelgezelschap"

De volgende proef is interessant omdat het de proefnemer geheel in het experiment opneemt. De beschrijving gaat uit van twee spiegels van ca 40 cm bij 1,2 m, die aan de korte kant met een stuk pianoscharnier aan elkaar gekit zijn.

Benodigdheden:

Twee scharnierend verlijmde spiegels, een bordgeodriehoek of -gradenboog.

Opstelling:

Stel de spiegels zo op een tafel op, dat je de hoek tussen de beide spiegels kunt veranderen van 0° tot 180° . Eén van de waarnemers moet tussen de spiegelende oppervlakken kunnen zitten en zijn eigen spiegelbeelden kunnen zien.

Vragen en opdrachten:

1. Bij een hoek van 180° zie je je eigen spiegelbeeld. Ga na dat dit spiegelbeeld niet identiek is met het beeld van je hoofd, gezien zonder spiegel.
2. Verklein de hoek langzaam tot 120° en beschrijf wat je ziet.
3. Probeer bij een hoek van 120° je eigen spiegelbeeld aan te kijken. Maak een bovenaanzicht/situatieschets van de echte en de spiegelbeeldhoofden en teken de kijkrichtingen. Welk spiegelbeeld is gelijkvormig met je eigen hoofd?
4. Verklein de hoek nog meer. Bij welke hoek liggen de spiegelbeelden van de spiegels in de vlakken van de andere spiegels?
5. Er is nu een vierde spiegelbeeld bijgekomen. Is dit beeld gelijkvormig met je eigen hoofd? Knijp één oog dicht en kijk het nieuwe spiegelbeeld aan. Wat zie je als je je hoofd enigszins draait ("nee"-schudt)?
6. Probeer elk van de beelden recht aan te kijken. Lukt dit? Maak van de verschillende "aankijksituaties" schetsjes met de kijkrichtingen erin.
7. Verklein de hoek nu nog verder totdat er eerst 4 en daarna 5 beelden zijn (60°)
8. Welke spiegelbeelden zijn "normaal" en welke zijn "spiegelbeeldig"?
9. Maak weer bovenaanzichten met kijkrichtingen van de verschillende mogelijkheden waarop jij de beelden (en de beelden elkaar) aan kunnen kijken. Geef ook in een bovenaanzicht weer hoe de beeldhoofden draaien als je je eigen hoofd draait.

5. "Hoekspiegels"

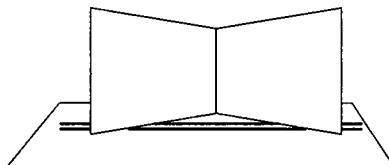
De volgende proef lijkt erg op de voorgaande, maar in een stations-practicum doen de leerlingen steeds maar een paar van de proeven.

Benodigdheden:

2 spiegels, scharnierend aan elkaar bevestigd, enig bladen blanco A4 papier. Een wit blad met zwarte lijnen en een zwart blad met witte lijnen.

Vragen en opdrachten:

1. Plaats de spiegels rechtop het blad met de lijnen, zodat er een symmetrische situatie ontstaat, zie de figuur.
2. Klap nu de spiegels open en dicht zodat er regelmatige veelhoeken te zien zijn.
3. Noteer op dit blad de hoekgrootte waarbij dat gebeurt:
gelijkzijdige driehoek ... graden
vierkant ... graden
vijfhoek ... graden
zeshoek ... graden
4. Bij welke hoek zal een regelmatige 20-hoek ontstaan?
5. Probeer nu verschillende andere figuren te krijgen zoals 4-, 5- en 6-sterren.
6. Beschrijf duidelijk hoe je dat moet doen.



6. "Herhaald spiegelen"

De volgende proef vraagt niet zoveel van het begrip, maar het werken in spiegelruimtes is wel erg fascinerend en vaak zeer fraai. Er wordt gebruik gemaakt van een drietal spiegels van ca 15 bij 30 cm die met de spiegeloppervlakken naar elkaar toe in de vorm van een gelijkzijdige driehoek op een stuk karton zijn gelijmd.

Doel van de proef:

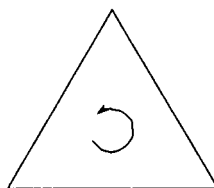
De eigenschappen van spiegelbeelden en spiegelbeelden van spiegelbeelden beter leren kennen.

Benodigdheden:

Drie spiegels gelijmd in de vorm van een gelijkzijdige driehoek. Een asymmetrisch poppetje, enige stukken driehoekig (in de spiegeldoos passende) tekenpapier, enige vellen A5.

Vragen en opdrachten:

1. Teken het patroon dat je in de spiegels ziet als er in de driehoek nog geen voorwerpen staan. Doe dit op A5 papier met driehoekszijden van 3 cm.
2. Plaats een asymmetrisch poppetje in de driehoek, niet op één van de symmetrielijnen. Verplaats het een beetje en let daarbij op het spiegelbeeld. Draai het figuurtje om zijn as en let daarbij op het draaien van de beeldfiguren.
3. Schets in de tekening die je bij opdracht 1. hebt gemaakt hoe de figuurtjes in de gespiegelde driehoeken zijn te vinden. Geef duidelijk aan welke er spiegelbeeldvormen hebben en welke er identiek zijn aan het origineel.
4. Geef in deze tekening ook aan hoe de draaiing in het echt (zie de figuur) doorwerkt in de wereld van de spiegelbeelddriehoeken.
5. Maak op het driehoekige tekenpapier met wat kleurpotloodlijnen een eenvoudige lijntekening, die regelmatig de rand van het papier (loodrecht) raakt.
6. Schets nu in je schrift wat je in de spiegeldriehoek kunt zien!



7. "De passpiegel"

De volgende proef is nogal eens verrassend, maar is gewoon gebaseerd op de spiegelwetten. De metingen komen vaak niet zo goed uit. Dat komt doordat de leerlingen vaak nogal ver voorover en achterover kunnen leunen en niet al te veel afstand tot de spiegel nemen.

Doel van de proef:

De bedoeling van deze proef is het betere leren kennen van de spiegelwetten door deze toe te passen.

Benodigdheden:

Grote spiegel, opgehangen op ooghoogte. Waterpas, meetlint, krijt of viltstift.

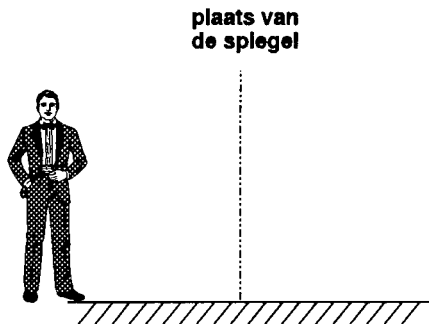
Opstelling:

Hang de passpiegel goed verticaal, zo hoog dat je jezelf geheel kunt zien.

Opdrachten:

1. Ga ca 3 m voor de spiegel staan (goed rechtop) en laat een helper de onderkant en de bovenkant van het beeld dat je van jezelf in de spiegel ziet op de spiegel aantekenen.

2. Vergelijk de hoogte en de grootte van het stuk van de spiegel dat voor een volledig beeld minimaal nodig is met hoogte en grootte van je eigen lichaamslengte.
3. Voer dezelfde opdrachten uit voor andere afstanden tot de spiegel en voor andere leden van je groep.
4. Teken in de figuur hiernaast het spiegelbeeld van de persoon en de zichtlijnen naar hoofd en voeten van het beeld, die de uiterste grenzen van een zo klein mogelijke spiegel bepalen.
5. Toon in deze figuur meetkundig aan dat de spiegel minimaal precies de helft van de lichaamslengte van de gebruiker moet zijn.



2.4 Het zien in of door doorzichtige media

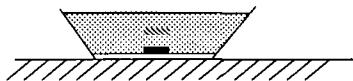
2.4.1 Beeldheffing en beeldstuwing

Het lijkt misschien wat eigenaardig om het zien in of door doorzichtige media als een aparte groep van verschijnselen te bespreken, want het is van nature zo dat het kijken altijd door een tussenstof heen plaatsvindt. Altijd kijk je door de lucht (vissen doen dat door het water) naar de voorwerpen die je wilt zien. Vaak komt daar nog eens een laag glas bij, een bril of een vensterruit. Soms wordt zelfs het oogvocht ervaren als iets waar je doorheen moet kijken, met name als er tijdelijk veel van is, of als het oogvocht door ziekte wat troebel is. Deze tussenstoffen worden echter in het dagelijkse bewustzijn vergeten, ze vallen niet op, de aandacht is bij het waargenomen voorwerp. Ze "springen pas in het oog" als ze min of meer ondoorlaatbaar worden. Denk aan mist, een rokerige kamer, een door smog vervuilde stadslucht, een krasserige bril of staar.

Omdat veel leerlingen een bril dragen en met die bril eigenlijk normaal zien, is het wel eens verrassend om het gesprek te openen met de vraag: "Wat hoort nu eigenlijk wel en wat hoort nu eigenlijk niet bij je oog?" Je kan het oog met zijn traanvocht als een geheel beschouwen, maar hoort de contactlens daar nu ook bij? In waarnemingsvraagstukken is het vaak wel handig om een oog met bril of met contactlenzen als een gezond geheel te beschouwen. Maar hoort de lucht voor het oog nu wel of niet bij het oog? Een gekke vraag misschien, maar gezien het feit dat het

voor een gezond menselijk oog niet mogelijk is om onder water scherp te zien, is het wel noodzakelijk dat er voor het oog een laag lucht aanwezig is en geen water. In ieder geval is het ondenkbaar dat er zich tussen het oog en het waar te nemen voorwerp niets (vacuüm) zou bevinden. Wat gebeurt er met een ruimtevaarder die zijn helm afzet?

Ook bij het beschouwen van verschijnselen die het gevolg zijn van het soort en de vorm van de tussenstof is het niet nodig om ons tot de een of andere modelvoorstelling van het licht te wenden. Noch is het nodig om theorieën op te stellen over het zien. We kunnen blijven staan bij de vraag: "Wat zien we?" Het zal mogelijk blijken om de waarnemingen te begrijpen en te ordenen door de waarnemingsbeelden zuiver en precies te beschrijven. De verschijnselen zullen hieronder beschreven worden in een min of meer natuurlijke reeks. Eerst bespreken we het effect van een vlakke mediumgrens, daarna de effecten van twee vlakke grenzen samen en tenslotte de beelden die ontstaan als we door twee gekromde mediumgrenzen kijken.



Een eenvoudige maar illustratieve proef: de proef met de zwevende stuiver. Een ondoorzichtige, ondiepe bak wordt midden in het lokaal op een verhoging (1,5 m) opgesteld en ongeveer in het midden leg je een muntstuk. De leerlingen komen allemaal om de bak heen staan, en stellen zich zo op dat ze de stuiver net niet kunnen zien. Dan wordt, voorzichtig zodat de stuiver op zijn plaats blijft, water in de bak gegoten. Ongeveer voor alle leerlingen tegelijk komt de stuiver weer "in beeld". Als dat gebeurd is, kunnen de leerlingen achteruit (of omlaag) gaan, zodat de stuiver weer niet te zien is en met wat meer water kan de stuiver weer zichtbaar worden.

Het is duidelijk dat die stuiver niet drijft of in het water zweeft. Je kunt voelen dat hij nog op de bodem ligt. In paragraaf 2.3.2 is al een en ander gezegd over het onderscheid dat je in de waarnemingswereld kunt maken tussen een "zichtvoorwerp" en een "tastvoorwerp". Tot nu toe viel dat wat je kan zien, het "zichtvoorwerp" of beeld, en dat wat je kunt aanraken, het "tastvoorwerp", samen. Onze ogen worden door onze handen bevestigd en omgekeerd. De apostel Thomas geloofde pas wat hij zag toen hij de wonden van Christus mocht aanraken. In onze eenvoudige proef wordt het zichtvoorwerp "losgescheurd" van zijn oorspronkelijke locatie. De genoemde bevestiging werkt niet meer en we worden verrast.

Het verschijnsel dat in deze proef naar voren komt wordt *beeldheffing* genoemd. Overal waar je het water *inkijkt* zijn de beelden meer of minder geheven. De heffing is naar het grensoppervlak water/lucht toe en hangt af van de hoek waaronder je het water inkijkt. Voor de verschillende opticaproeven is het handig om een (aquarium)bak te hebben waarvan ook de bodem van glas is. De bodemheffing voor het loodrecht het water inkijken kan met zo'n bak gemakkelijk gemeten worden. Als je van boven naar een voorwerp onder de bodem van het aquarium kijkt, door de laag water heen, dan zie je het beeld van dat voorwerp een stukje geheven. Je kan dan een ander voorwerp naast het aquarium houden en het zo inrichten dat je het geheven beeld en het voorwerp naast het aquarium op dezelfde hoogte ziet. Het beeld blijkt zich dan op circa 0,75 van de hoogte te bevinden. Het omgekeerde van dit getal, 1,333 wordt de brekingsindex van water genoemd, beter gezegd: de brekingsindex bij de overgang van lucht naar water.

Het verschijnsel van de bodemheffing was vroeger in heldere sloten en is tegenwoordig in zwembaden mooi waar te nemen. Het is dan even wachten op het moment dat er niemand zwemt en het wateroppervlak glad is. De bodem die het dichtst bij is, ziet men het minst geheven. De bodem op een grotere afstand, waarnaar men dus schuin door het water moet kijken, ziet men sterker geheven. Lopend langs de badrand kan men zien dat de bodem hol lijkt, dichtbij het diepst. Het is hier op zijn plaats erop te wijzen dat het verschijnsel voor ons westerse mensen hooguit een eigenaardigheid is, maar niet zo belangrijk. Maar iemand die bijvoorbeeld vis vangt met een speer of met pijl en boog, moet wel degelijk rekening houden met de beeldheffing. Hij wordt op een voor hem zeer belangrijke manier geconfronteerd met het "losscheuren" van beeld- en tastvoorwerp: beelden kan je niet eten!

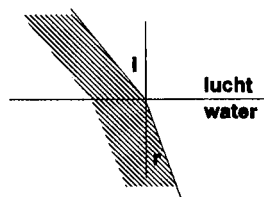
Het omgekeerde van beeldheffing, "*beeldstuwing*", kan je ervaren als je vanuit het water naar voorwerpen in de lucht kijkt. Een experiment is niet gemakkelijk in het leslokaal uit te voeren. Wel kan je de leerlingen vragen om zelf een onderwatersituatie op te zoeken. Met een buisje in de mond kan je het vrij lang onder water uithouden, lang genoeg om de beelden die er te zien zijn te gaan herkennen. Liefst een duikbril gebruiken, omdat het zonder zo'n bril niet mogelijk is een scherp zicht te krijgen. Er is dan te zien dat de beelden van de voorwerpen boven het wateroppervlak naar boven gestuwd zijn. Daarbij ziet men de hele buitenwereld in een relatief klein cirkelvormig gebied samengedrongen. (De gezichtskegel heeft een halve tophoek van 48°). Buiten die cirkel zie je een zeer goede zilverachtige spiegeling van de wereld onder water.

Hier is het een goede oefening om zich een voorstelling te maken van hetgeen een vis, die in een heldere sloot zwemt, kan zien. De vis ziet

de bodem, de planten en andere vissen direct onder zich en om zich heen, dat is zijn wereld. Als de vis een beetje naar boven kijkt, dan ziet hij (als het oppervlak niet golft) diezelfde wereld nog eens, keurig in het 'plafond' gespiegeld. Kijkt de vis nu echt naar boven, dan heeft hij de mogelijkheid om het water uit te kijken en dan ziet hij de hem vreemde lucht-wereld, niet een deel, maar alles. Ook de vissers en de reigers die zich aan de rand van de sloot bevinden. Alles is echter sterk vervormd door de beeldstuwing naar boven.

Het is nu voor het exacte denken en natuurbeschouwen interessant om de verschijnselen op nog een andere manier te tonen en te laten beleven. De volgende proeven leveren namelijk een schijnbare tegenspraak in vergelijking met de beeldheffing en de beeldstuwing.

Laat een begrensde lichtruimte een vlakke lucht-watergrens treffen. Een licht-ruimte is niet zichtbaar, de plaats kan alleen zichtbaar gemaakt worden door in de licht-ruimte voorwerpen te brengen die men kan zien. In de proefopstelling hiernaast zijn de licht- en duisternisruimtes schematisch aangegeven. De grenzen kunnen zichtbaar gemaakt worden met een stuk wit papier of plastic. Men kan ook boven water rook of krijtstof gebruiken en onder water een minimale hoeveelheid fluoresine. De licht-donker grens is in het water en in de lucht rechthoekig, maar vertoont een knik bij de lucht-watergrens. De grootte van de knik hangt af van de hoek van inval



volgens de wet van Snellius: $\frac{\sin i}{\sin r} = n$ waarin i de hoek van inval, r

de hoek van refractie en n de brekingsindex is. De knik is dus sterker bij schuinere inval.

Het verschijnsel kan beschreven worden als een het water *inzuigen* van de lichtruimte. Tegelijk is het belangrijk om erop te wijzen dat het niet mogelijk is om de gehele lichtbundel het water in te schijnen. Steeds wordt een deel gespiegeld; de intensiteit van de gespiegelde bundel, is groter naarmate de hoek van inval groter wordt. Zie ook paragraaf 3.3.1.

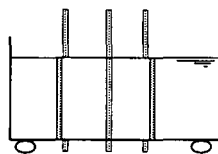
De hierboven genoemde tegenspraak komt het duidelijkst naar voren als we de leerlingen het water in laten kijken naar een schuin in het water gestoken stok. Deze lijkt naar boven geknikt, hetgeen in overeenstemming is met het verschijnsel dat we beeldheffing hebben genoemd. De licht- en schaduwbundels worden bij de overgang lucht-water juist het water *ingeknikt*. Dat lijkt een precies tegengestelde beweging, maar de

tegenspraak wordt opgeheven zodra duidelijk wordt dat de blikrichting ook gewoon aan de wet van Snellius voldoet en op dezelfde manier het water *ingezogen* wordt als de lichtruimte. De afbuiging van onze blikrichting doet ons het beeld op een andere plaats aanwijzen, naar het oppervlak toe geheven.

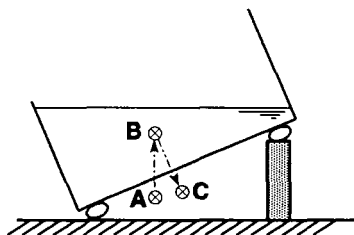
Bij de beeldstuwing doet zich een soortgelijke schijnbare tegenspraak voor. Vanuit het water kijkend ziet men de stok naar boven geknikt, terwijl de lichtkegel van een onderwaterlamp bij het passeren van de water/luchtgrens juist gespreid wordt. Ook hier is het weer de afbuiging van onze blikrichting die de tegenspraak verklaart.

2.4.2 Beeldverschuiving, breking

De volgende stap is nu het kijken door twee grensvlakken: lucht/water en water/lucht, beide vlak en evenwijdig. De proef is eenvoudig zo in te richten dat men voor de klas een aquarium opstelt, gevuld met water; vlak daarachter plaatst men drie verticale staven. Er is dan voor iedereen goed te zien dat de middelste staaf ongeveer rechtdoor blijft lopen, maar dat de beelden van de buitenste staven naar buiten zijn verschoven. Men noemt dit planparallele verschuiving. Deze verschuiving vindt niet alleen, zoals in de figuur getkend, naar links en rechts, maar natuurlijk in alle richtingen plaats. De mate van verschuiving hangt af van de dikte van de waterlaag en van de hoek van inval. Voor zorgvuldige waarnemers is ook te zien dat de glazen wanden van het aquarium ook al een beeldverschuiving naar buiten toe verzorgen. Deze verschuivingen laten zien dat we alles wat we door een medium met vlakke, evenwijdige grenzen zien in principe al vergroot waargenomen wordt. De vergroting bij het kijken door een vensterruit is minimaal, maar in principe reeds aanwezig.



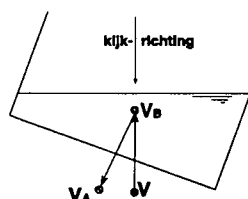
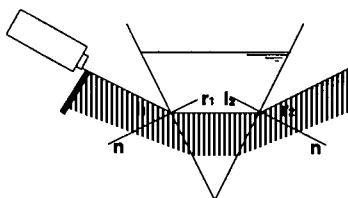
Als eerstvolgende stap in de reeks kijken we door twee grensvlakken die nog wel vlak maar niet meer evenwijdig zijn. Dat gaat het gemakkelijkst door het (halfvolle) aquarium scheef op te stellen. De twee grensvlakken krijgen dan een snijlijn, de "brekende rand" genaamd. Het beeld van een voorwerp wordt dan steeds



naar de brekende rand toe verplaatst. Deze verschuiving kan inzichtelijk gemaakt worden door de respectievelijke beeldverplaatsingen niet tegelijk te beschouwen, maar alsof ze na elkaar, in ieder geval onafhankelijk van elkaar plaatsvinden. In de figuur hiernaast staat het aquarium een beetje scheef. Bij A is de plaats van het voorwerp aangegeven. Van daar uit gaat een pijl naar B, de plaats waar het beeld zich zou bevinden als er alleen beeldheffing zou zijn ten gevolge van het kijken *in* het water. Vervolgens gaat een pijl naar C, de plaats van het beeld waar het zich bevindt als er ook nog beeldstuwing plaats vindt, ten gevolge van het kijken *uit* het water. Uit de meetkunde van de situatie is het duidelijk dat de netto beeldverschuiving, van A naar C, altijd naar de brekende rand plaatsvindt. Bovendien is duidelijk dat de mate van beeldverschuiving afhangt van de grootte van de hoek tussen de beide oppervlakken. Hoe groter deze hoek hoe sterker de beeldverschuiving.

De beeldverschuiving is ook heel goed te zien in een prisma-vormige bak, gevuld met water; de brekende rand is dan onder. Om iemand aan de andere kant van de bak aan te kunnen kijken moet je (soms erg) naar beneden kijken. Tegelijk ontstaan natuurlijk de gekleurde randen, maar daar hoeft je bij deze proeven nog niet direct de aandacht op te vestigen, ze zullen later besproken worden (paragraaf 3.3.1).

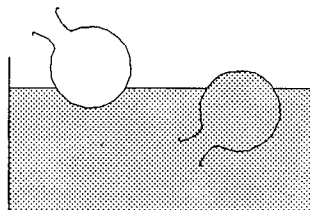
Het is hier interessant om even stil te blijven staan bij de twee onderscheidbare wijzen waarop je over deze verschijnselen kan spreken. Je kan spreken over licht- en donkerruimtes die bij een water/luchtgrens een knik maken en je kan spreken over beeldverschuivingen. Deze twee manieren vullen elkaar prachtig aan. Kijkt men met het licht mee, dan ziet men de beeldverplaatsing naar de brekende rand toe en kijkt men dwars op de proefopstelling, dan ziet men, in een iets vertroebeld medium, de tweemaal geknikte licht/donkergrens. De twee proeven vullen elkaar aan. De beeldverplaatsing en de breking zijn de twee aangezichten van een en hetzelfde fenomeen. Beide worden door waarneming gevonden en door het denken met elkaar verbonden. Beide manieren kunnen ook wiskundig beschreven worden: de breking met de brekingsindex en de beeldverplaatsing met vectoren.



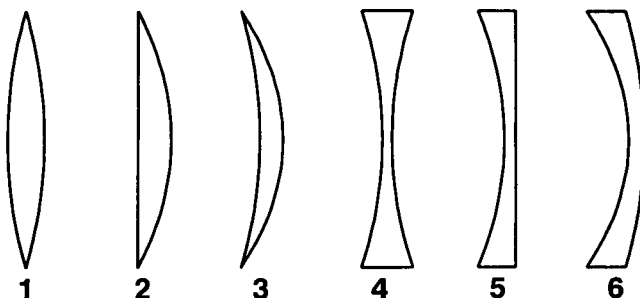
2.4.3 Beeldvergroting/verkleining

We vervolgen onze beschrijving met een reeks van proefjes waarbij door een medium gekeken wordt waarvan de grensvlakken niet meer vlak zijn. We hebben dan te maken met allerlei soorten lenzen.

Men kan van boven een aquarium inkijken en dan een wat groter horlogeglas op het water laten drijven. Een geschikt voorwerp om naar te kijken is een schaakbordachtig vel papier met zwarte en witte vierkantjes (3 bij 3 cm). Ook kan men het horlogeglas ondersteboven onder water houden en dan enigszins boven het oppervlak uit tillen, zodat wat water mee omhoog gezogen wordt. Hetzelfde effect kan sterker bereikt worden met een wat grotere rondbodemkolf. Nog sterker worden de effecten als de bolle kolf geheel gevuld wordt met water of geheel leeg helemaal onder water gehouden wordt.



Er zijn nu zes verschillende mogelijke vormen:



1. dubbelbol: de vorm die overeenkomt met een geheel met water gevulde bolle kolf;
2. platbol: deze vorm kregen we door 'wat water met kolf en al "boven het oppervlak uit tillen";
3. holbol: deze vorm is met water niet gemakkelijk te maken, hij wordt vooral voor contactlenzen gebruikt;
4. dubbelhol: deze vorm krijg je als je de lege kolf onder water houdt;
5. plathol: als je met een lege kolf alleen wat water wegduwt;
6. bolhol: ook deze vorm is met water moeilijk te maken, maar vindt veel toepassing in contactlenzen.

Deze mogelijkheden vallen uiteen in twee groepen van drie. De eerste drie zijn in het midden dikker dan aan de randen en worden bolle lenzen genoemd, de andere zijn in het midden dunner dan aan de randen, holle lenzen.

In de proefjes in het aquarium is direct te zien wat zo'n holle of bolle lens met een voorwerp vlak achter de lens doet. Een bolle lens zorgt voor een vergroting en een holle zorgt voor een verkleining. Bij een brildrager kan je aan het verloop van de rand van zijn/haar gelaat ogenblikkelijk zien of de bril hol dan wel bol is. Een holle of bolle lens vlak voor een tekst geplaatst kan het volgende beeld geven:



Hierbij valt nu reeds op te merken dat bij de vergrotende lens sommige letters niet meer zichtbaar zijn. Bij de lens die verkleint zijn sommige letters zelfs tweemaal te zien.

De beeldvervorming door een lens kan in eerste instantie goed begrepen worden uit de beeldverschuivingen die bij een prisma optreden. Een bolle lens heeft natuurlijk een mooi geslepen oppervlak maar voor het begrip kunnen we even denken dat zo'n lens opgebouwd is uit een stapeltje (afgeknotte) prisma's. Door elk van die prisma's is een deel van het voorwerp vlak achter de lens te zien. Al die delen worden stuk voor stuk een beetje naar de brekende rand van het prisma verschoven. De brekende hoek is bij een bolle lens de rand van de lens. Het gevolg is een vergroting van het beeld. Op dezelfde manier past de verkleining door een holle lens in onze reeks van waarnemingen.

Het is hier op zijn plaats even terug te kijken naar de methode die gevolgd is. Er is een duidelijke logische lijn geschetst vanaf de beeldheffing/beeldstuwing via de beeldverplaatsing door een prisma naar de vergroting/verkleining door een lens. Steeds is vastgehouden aan de directe waarnemingen en zijn deze in een samenhang geplaatst door van eenvoudig naar complex te gaan. Deze methode is om pedagogische redenen gekozen.

De verhoudingen van licht- en duisternisruimtes rondom lenzen laten zich prachtig bestuderen door lenzen in een aquarium te plaatsen, waarbij aan het water een beetje fluoresceïne is toegevoegd. De lichtbron,

een diaprojector, blijft dan natuurlijk naast het aquarium staan en schijnt het water in. Met geschikte lenzen voor de projector kan men nu eerst laten zien wat er bedoeld wordt met een *divergerende*, een *evenwijdige* en een *convergerende* bundel. Men kan deze bundels beschrijven als licht-ruimtes die gaandeweg uiteenwaaieren (divergent) of samengeknepen worden (convergent). Scherp zicht kan alleen plaats vinden door middel van divergerende en evenwijdige bundels. Dat is gemakkelijk in te zien, als je bedenkt dat de lichtruimte om een kaars duidelijk divergerend is en men een kaars goed kan zien. Ook voorwerpen op (oneindig) grote afstanden, met evenwijdige lichtruimtes, kan men goed zien. Maar voor convergerende bundels is de lenswerking van het oog te sterk om nog tot goed, scherp zicht te leiden.

Het beste worden zulke proeven onder water zichtbaar als er gebruik gemaakt wordt van een vierkant diafragma, de licht/duistergrens is dan scherp. Het verdient ook aanbeveling om enige (en als er tijd is alle) proeven te herhalen met een negatief diafragma, waardoor de eigenschappen van een duisternisbundel in een lichtruimte onderzocht kunnen worden. Ook heel interessant zijn de eigenschappen van lenzen, die men kan maken door twee vrij grote horlogeglazen met siliconenkit op elkaar te lijmen. Deze "omgekeerde lenzen" omvatten onder water een lichtruimte met ronde oppervlakken en werken dus ook als lens.

In een aquarium met fluoresine kan zichtbaar gemaakt worden dat bolle massief glazen lenzen convergerende bundels sterker convergerend maken en dat divergerende bundels evenwijdig worden of zelfs convergent. Het punt achter een bolle lens waar een evenwijdige lichtruimte samengeknepen wordt tot één punt, noemt men het brandpunt. Sterke lenzen hebben voor dat samenknijpen maar weinig afstand nodig en dus een kleine brandpuntsafstand. De sterkte S van een lens wordt berekend

uit de brandpuntsafstand f (in m) met $S = \frac{1}{f}$. De eenheid is dioptrie, ofwel m^{-1} .

Bij een holle lens kan men ook spreken van een brandpunt, zij het dat dit niet direct met branden in verband gebracht kan worden. Een evenwijdige lichtruimte wordt op zo'n manier divergent gemaakt dat hij uit één punt afkomstig lijkt. Dat punt is bij de holle lens het brandpunt.

Raadselachtig blijft altijd toch nog wat men kijkend door een lens kan zien. Voor een holle lens is dat eenvoudig, de hele wereld achter de lens is voor het zicht samengedrongen. Deze gehele ruimte is steeds goed en geheel te overzien, onafhankelijk van de plaats van de waarnemer, de plaats van de voorwerpen en de sterkte van de lens. De beelden van alle

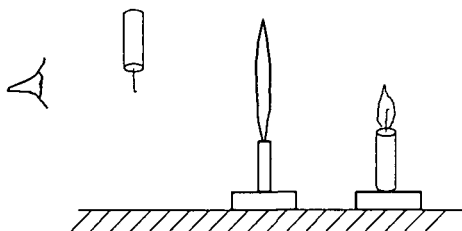
voorwerpen die je door een holle lens ziet zijn dichterbij de lens dan de voorwerpen zelf, net zoals bij een bolle spiegel. Bij een bolle lens ligt het wat ingewikkelder. Als je een bolle lens vlak voor het oog houdt, dat wil zeggen dat het brandpunt binnen het nabijheidspunt* gelegen is, dan kan een gezond oog geen scherp beeld van de omgeving krijgen. Het oog krijgt een convergerende lichtruimte aangeboden en de lenswerking van een gezond oog is dan te sterk om een scherp beeld te kunnen krijgen. Houdt men de lens zo dat het brandpunt buiten het nabijheidspunt gelegen is, dan zal de aard van het beeld afhankelijk zijn van de plaats van het voorwerp. Een voorwerp vlak achter de lens wordt enigszins vergroot gezien. Het beeld is virtueel, dat wil zeggen dat het niet op te vangen is met een scherm. Verplaatst men dit voorwerp zodat het wat verder van de lens afkomt te staan, dan neemt de vergroting toe. Dit is de loepwerking van de bolle lens. Tegelijkertijd ziet men het beeld achter de bolle lens steeds verder weg. Hier ervaren we dus weer een tegenstelling: de ene waarneming, het beeld verder weg zien, spreekt de andere, het beeld groter zien, tegen. De vergroting is maximaal als het voorwerp zich in het brandpunt bevindt. Elk detail van het voorwerp is dan beeldvullend! Tegelijkertijd ziet men het voorwerp oneindig ver weg, wat we kunnen bemerken aan het feit dat we de details met ongeaccomodeerd oog kunnen zien. Verplaatst men het voorwerp nu nog verder van de lens af dat is er een tijdlang geen beeld meer mogelijk, maar vanaf een bepaalde afstand ontstaat er weer een beeld. Het is echter fundamenteel veranderd. Het beeld is nu weer een stuk kleiner, men ziet het omgekeerd, maar het belangrijkste is dat het reëel is, dat wil zeggen dat het niet alleen zichtbaar is, maar ook opvangbaar op een scherm.

Het beeld legt in deze beschrijving een weg af door het oneindige en maakt daarbij een metamorfose door in grootte en van virtueel naar reëel. Deze gang door het oneindige is goed vergelijkbaar met hetgeen gebeurt met het beeld van een spiegel die van bol steeds meer hol wordt (zie paragraaf 2.3.5)

Ofschoon de reële beelden goed bekend zijn van dia- en filmprojecties, vormen ze voor de leerlingen altijd vreemde verschijnselen. Een vrij zwevend beeld zomaar ergens in de ruimte op een heel precieze plaats gelokaliseerd, daar moet je kennelijk even aan wennen. De volgende opstelling geeft de indruk dat de ondersteboven-kaars ook brandt. In werkelijkheid ziet men het beeld van de kaarsvlam achter de lens ter

* Dat is circa 10 cm voor het oog, afhankelijk van de leeftijd van de waarnemer.

plekke van het lont. De plaats van de waarnemer is in een goed afgestelde opstelling niet erg kritisch:



Tenslotte kan men bij de bespreking van lenzen de aandacht vestigen op de wetenschappelijke praktijk. In alle wetenschappen waar optische apparaten gebruikt worden, zijn dit altijd vergrotende apparaten. Denk aan het gebruik van een microscoop, een loep, een telescoop, maar ook elektronenmicroscopen. "De wetenschap kijkt nu al zo'n 400 jaar door vergrootglazen." Op zich is daar niets mis mee, maar het is wel goed om er eens bij stil te staan. Bovendien is het uit de aard van de zaak zo dat, als een voorwerp vergroot wordt, het los komt te staan van de omgeving. De verbinding van een voorwerp met de omgeving wordt bij het gebruik van een bolle lens dus al onzichtbaar. Om te microscopiseren moet men het preparaat nog verder van zijn natuurlijke omgeving losmaken. Het zal van de onderzoekers een extra inspanning vergen om een vergroot voorwerp ook nog in zijn natuurlijke omgeving en samenhang te kunnen zien. Wie is daar blijvend toe in staat? Draagt het steeds maar turen door vergrotende apparaten bij tot het niet meer als een geheel ervaren van de natuur, wat toch de bron is van de grote milieuproblemen in onze tijd?

2.5 Randfenomenen

2.5.1 Aanzet tot fenomenologische benadering

Over het thema buiging en interferentie is zeer veel geschreven en er zijn ook vele proefopstellingen bedacht om deze fenomenen te tonen. Deze allemaal systematisch te bespreken is ondoenlijk en ook niet van belang voor een bespreking in de klas. Hier zullen we proberen deze verschijnselen op fenomenologische wijze te belichten. Veel zal daarbij onbesproken blijven, omdat het nog niet gelukt is ten aanzien van alle aspecten van deze fenomenen een modelvrije visie te ontwikkelen. De

mathematische beschrijving, die ook in de fenomenologische beschrijving thuishoort, zal zeer beknopt zijn.

De eerste stap op de weg van de fenomenologie is het leren kennen van het veld van fenomenen dat men onderzoekt. Hiertoe kan men allerhande literatuur opslaan en proeven herhalen. Als tweede stap wordt naar het oerfenomeen gezocht, door systematisch het wezenlijke van het onwezenlijke te onderscheiden en zo naar de eenvoudigste proefopstelling op zoek te gaan, die niet verder geanalyseerd kan worden. Aan dit oerfenomeen dan nóg een fenomeen ten grondslag willen leggen zou betekenen, dat men het waarnemingsveld verlaat en in eenzijdige voorstellingen opgaat.

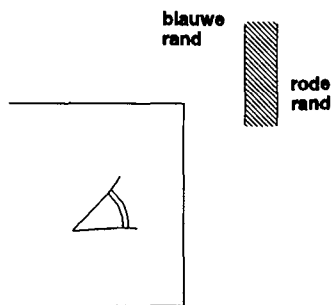
Ten aanzien van de buigings- en interferentieverschijnselen kunnen drie verschillende typen fenomenen onderscheiden worden:

<i>randfenomenen</i>	<i>vlakfenomenen</i>	<i>beeldfenomenen</i>
proef van Fresnel	zeepbellen	interferometer
proef van Young	oliefilm	van Michelson en
biprisma	newtonringen	van Fabry Perot
halfenzen Billet	glasplaatjes op elkaar	hologram

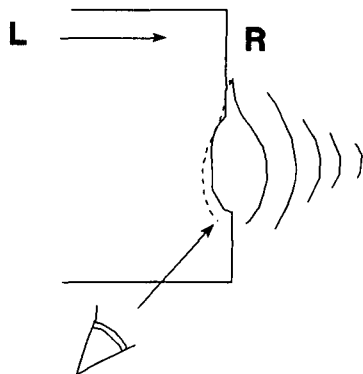
De randverschijnselen aan één rand zullen als uitgangspunt voor nader onderzoek gekozen worden. Er zal hier een gerichte selectie van proeven beschreven worden die een *synthetisch* karakter hebben (zie paragraaf 3.2.1)

- Belicht een wit vel papier op een zwarte en een zwart vel op een witte achtergrond. De randen worden extra licht en donker (Mach fenomeen). De mens neemt de spanning tussen licht en duisternis reeds waar, die in dit verschijnsel nog niet tot uiterlijk fenomeen is geworden.
- Belicht een plaat met een scherpe rand en bekijk deze van achteren. De rand is lichtend.
- Houd op enige afstand van het oog een zwart karton tegen de blauwe lucht. Aan de rand ziet men de lijnen van Mach. Beweegt men door één oog kijkend het karton naar zich toe totdat de rand onscherp wordt, dan ziet men de lichte en donkere machlijnen nog duidelijker en daartussen tevens een soort halfschaduw. Deze is streepjesachtig maar ongestructureerd.
- Kijk vervolgens langs de verticale rand van een karton, dat op enige centimeters afstand van het oog gehouden wordt, naar een verticale kozijnrand die zich donker aftekent tegen de lichte achtergrond.

Beweegt men het karton naar de binnenste kozijnrand, dan ziet men deze rand blauw. Beweegt men het karton over het kozijn heen tot de buitenste rand ervan, dan ziet men deze rand rood/geel. Varianten van deze proef, zoals de randen horizontaal nemen, geven hetzelfde resultaat.



- Kijk in het donker naar een kaarsvlam die op enige meters afstand staat. Om de vlam ziet men een lichtschijnsel, de nimbus. Kijkt men langs de rand van een karton dat men op enige centimeters van het oog houdt, dan trekt de nimbus zich links en rechts van de vlam samen tot een lichtzuil die loodrecht op de rand staat. Beweegt men het karton van links naar rechts verder de vlam in, dan wordt de lichtzuil als het ware ingedeukt en ziet men de binnenste rand van de vlam rood. Beweegt men het karton nog verder naar rechts, dan ziet men de buitenste rand van de vlam blauw kleuren. Tevens wordt de lichtzuil gestreept, waarbij het patroon onregelmatig is en de afstanden tussen de lijnen naar buiten toe steeds kleiner worden.
- Neem vervolgens twee kaartjes met de verticale randen evenwijdig naast elkaar. Houd ze op enige afstand van het oog tegen een lichte achtergrond en beweeg ze naar één oog toe. Eerst ziet men de randen scherp, later onscherp met een halfschaduw tussen de machlijnen. Beweegt men op enige centimeters afstand van het oog de kaartjes naar elkaar toe, dan zullen de lichte machlijnen elkaar raken en een heel lichte streep midden in de spleet geven. Raken vervolgens de halfschaduwen elkaar, dan ontstaat een gestructureerd streepjespatroon tussen de spleet, waarvan men de streepjes echter niet kan tellen.
- Kijk door de spleet van twee kaartjes naar een kaarsvlam en varieer de spleetbreedte tot een optimaal resultaat bereikt wordt. Aan beide zijden van de vlam ziet men een nog duidelijker en gekleurd streep-



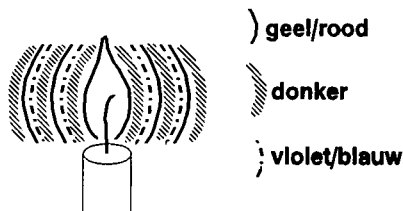
jespatroon ontstaan. Het is van belang de randen van de kaartjes goed strak te nemen, zodat een regelmatig streepjespatroon ontstaat. Met twee scheermesjes lukt de proef nog beter. Deze kan men eventueel met behulp van wat plasticine op een microscoopglasje plakken, zodat de proefondervindelijk vastgestelde spleetbreedte behouden blijft. Dit glaasje kan men dan de klas rond laten gaan.

- Houd vervolgens de mesjes niet naast maar twee centimeter voor elkaar en bedek met het voorste mesje de vlam tot de randstrepen ontstaan. Beweegt men nu het achterste mesje dwars op de kijkrichting zo, dat de spleet langzaam gesloten wordt, dan ziet men aan de zijde van het achterste mesje de randstrepen oprekken tot een regelmatig streepjespatroon. Deze proef lukt nog beter wanneer men beide mesjes aan de onderkant tussen duim en wijsvinger klemt en de spleetbreedte zo instelt, dat aan beide zijden van de vlam een regelmatig streepjespatroon ontstaat. Duwt men dan al kijkende één van de mesjes naar achteren, dan ziet men aan de zijde van het weggeduwde mesje het bredere en regelmatige streepjespatroon en aan de andere kant het gestuwde patroon, dat hoort bij één rand.

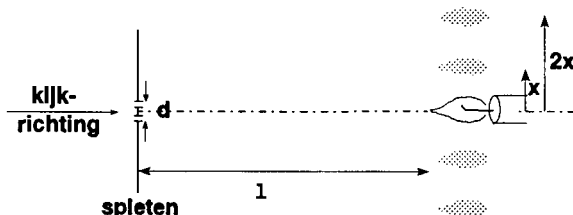
Door een proevenreeks op een dergelijke wijze op te bouwen wordt het mogelijk het ontstaansproces van de randfenomenen dynamisch in de voorstelling op te nemen. Kijkt men langs één rand naar een vlam, dan wordt de rand ingedrukt en ontstaat er een gestuwd streepjespatroon. Kijkt men nu tegelijkertijd langs een tweede rand, dan worden de streepjes opgerekt tot een regelmatig patroon. De onscherpe rand en de zijkant van de pupil vormen daarbij een zeer nauwe opening waardoor gekeken wordt. Men brengt dus een grote mate van verduistering aan door het oog grotendeels toe te dekken. Door de tweede rand neemt deze verduistering nog verder toe.

Kijkt men door een spleet, dan ziet men een gestructureerd beeld. Tevens ziet men de randen van de spleet ingedrukt. Voor de tastwereld heeft de spleet een meetbare opening. Voor de beeld- en lichtwereld is dit blijkbaar niet zo. Vanuit het beeld gezien is de breedte niet eenduidig en is de opening gestructureerd. Het kleurverloop is vergelijkbaar met dat van de regenboog en een lichtspleet bij een prisma.

Het zijn verveelvuldigde platgedrukte beeldjes van de vlam met een rode en blauwe rand. Omdat deze fenomenen optreden onder de invloed van de



toenemende verduistering, mogen we concluderen dat verduistering in deze omstandigheden structuur en verveelvoudiging met zich meebrengt. Dit zijn kwaliteiten die verwant zijn aan de wereld van de kristallen, waar vorm en meervoudigheid karakteristiek zijn. De duisternis hangt dan ook samen met het stoffelijke en wordt in de hoogste mate vertegenwoordigd door de vaste stof.



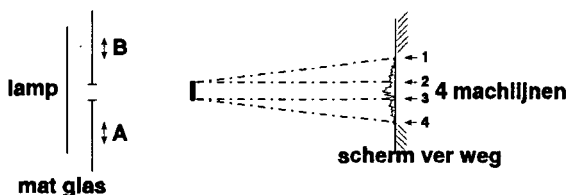
Kijkt men door twee of meer spleten, dan ontstaat een verdergaande regelmaat van het patroon. Bij een tralie met een toenemend aantal lijnen neemt naast de regelmaat ook de breedte van de beeldherhaling toe. Men herkent dan ook heel duidelijk de vlamvorm. Er bestaat een lineaire getalsverhouding tussen scherm afstand, spleet afstand en breedte van het

beeld. Er geldt: $\frac{x \cdot d}{l} = \text{constant}$.

Deze constante is typisch voor de kleur van de betreffende lichtbron en zullen we daarom het kleurgetal noemen. Dit getal wordt ook bij de proeven aan dunne laagjes gevonden.

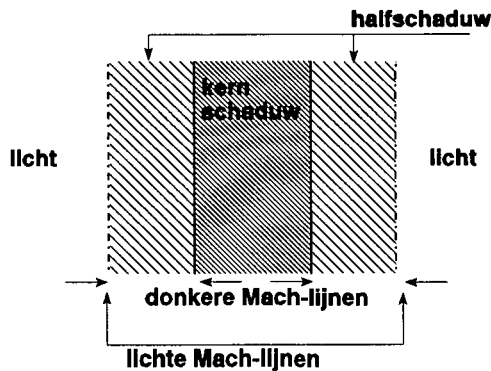
De beschreven getalsverhouding is karakteristiek voor de kleur van het licht, maar verwijst niet naar licht als golf. Hij toont een relatie tussen drie lengtedimensies. Het kleurgetal heeft een eendimensionale lengteenheid. De dynamiek tussen licht en duisternis bij de randfenomenen wordt door het kleurgetal niet direct weergegeven. Mogelijk kan de getalsrelatie tussen de verschillende afstanden wel een bijdrage leveren om inzicht te krijgen in deze dynamiek.

Om het zicht op de licht- en duisternistendensen die in de randfenomenen werkzaam zijn te verdiepen zullen we nu naast de reeds beschreven subjectieve proeven een aantal objectieve proeven beschrijven.



- Maak de reeds in paragraaf 2.2 beschreven proefopstelling, waarmee een schaduwbeeld van een voorwerp kan worden gemaakt (zie figuur vorige pagina).

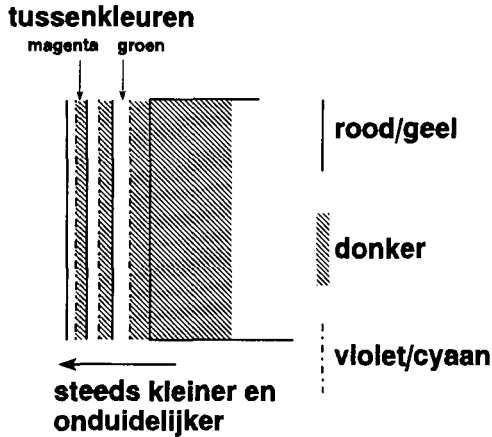
Verschuift men het strak afgesneden karton A, dan verschuiven de machlijnen 1 en 3 perspectivisch mee. Maakt men de lamp middels de spleet AB kleiner, dan worden de halfschaduwen 1-2 en 3-4 overeenkomstig kleiner. De door de mens waargenomen lijnen van Mach komen dan dicht bij elkaar. Door de plaatjes A en B symmetrisch naar elkaar toe en van elkaar af te bewegen kan men de schaduwbewegingen heel goed waarnemen. Wordt de spleet AB nu heel klein, dan wordt de schaduw klein en scherp. Vanuit de perspectiviteit gezien zou men verwachten dat de schaduw volmaakt scherp wordt als de spleet AB uiterst klein is. Maar dat gebeurt nu net niet.



Wanneer de randen A en B elkaar zeer dicht genaderd zijn en de machlijnen elkaar haast raken, gaat de perspectiviteit ten opzichte van de spleet verloren en treedt er iets nieuws in verschijning. Een lijnenpatroon wordt nu uiterlijk zichtbaar.

We zullen dit fenomeen nu vanuit verschillende invalshoeken beschrijven.

1. Eerst proberen we de beweging van het schaduwbeeld te volgen en mee te beleven. Daartoe dient de proef in een goed verduisterd lokaal plaats te vinden. In plaats van een scherm kan men beter een matglazen plaat nemen en die van achteren bekijken. Door de spleet symmetrisch kleiner te maken wordt de kernschaduw groter. Tevens bewegen de lichte en donkere machlijnen naar elkaar toe, waardoor de halfschaduw, het beeld van de lamp/spleet, aan *beide* kanten kleiner wordt. Is de spleet smal genoeg en staat de schaduwrand precies *evenwijdig* aan de spleetranden, dan treedt een nieuw randfenomeen op. Er ontstaan gestuwde beeldherhalingen van de machlijnen met daartussen halfschaduw in kleur.



De stuwing aan de randen, die de mens vroegtijdig waarneemt, is hier tot objectief fenomeen geworden. De machlijnen zijn dus niet het gevolg van de onvolkomenheid van het oog, maar juist van de genialiteit ervan om de spanning tussen de licht- en duisternistendens reeds zichtbaar te maken, voordat die onder bijzondere omstandigheden tot fenomeen wordt.

2. Vanuit de inkrimpende lichte en de uitbreidende donkere machlijnen gezien, kan men ook stellen dat de duisternis - het groter wordende kernschaduwgebied - over de lichtgrens heen gaat. De duisternis komt dan in het lichtgebied waar het volgens het puntperspectief niet kan zijn. Er ontstaat een ritmisch patroon doordat licht en duisternis niet in hun eigen domein blijven, maar in elkaars gebied komen. Op dezelfde wijze als bij het gesloten kringproces, waar de elektrische en magnetische tendens het kringproces als een dynamisch proces begrijpelijk maken, kan hier gezocht worden naar de dynamiek tussen de opposanten die hier werkzaam zijn. Bij deze proeven zijn dat het licht en de duisternis, die in relatie tot elkaar gebracht worden. We gaan niet uit van analoge systemen, zoals water- of geluidsgolven, en zullen ook hier de fenomenen de weg moeten laten wijzen voor het denken.

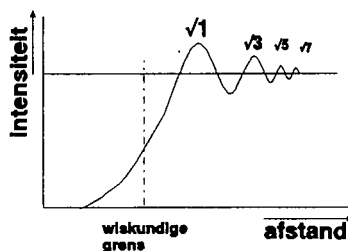
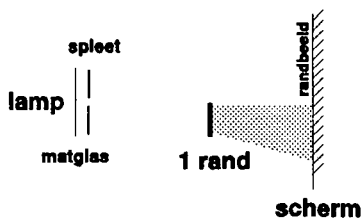
We vatten de beschreven fenomenen nogmaals samen:

- Normaal is een schaduw des te scherper als de lamp/spleet klein is en het voorwerp dichtbij het scherm staat. Bij de beschreven proeven krijgt men echter een des te beter beeld wanneer de lamp/spleet eveneens klein is, maar het voorwerp juist dichtbij de lamp komt.

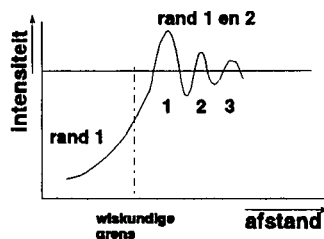
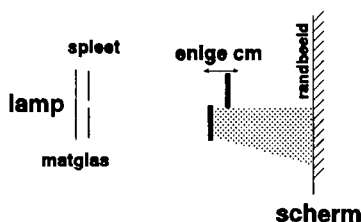
- Bij een normale schaduw hangt de vorm ervan samen met de afstand van de lamp tot het scherm en van het voorwerp tot het scherm. Bij de randfenomenen hangt de vorm in hoofdzaak af van de afstand van het voorwerp tot het scherm.
- De randen van de lamp/spleet en die van het voorwerp moeten evenwijdig, scherp en ondoorzichtig zijn, willen de randfenomenen goed zichtbaar worden.
- Er ontstaan randkleuren, vergelijkbaar aan de prismatische randkleuren, met als toegevoegde kleuren groen en magenta.
- Er ontstaan meerdere afbeeldingen van de lamp/spleet met kleurranden, waarbij de rood/gele kleurrand het meest naar buiten en de lichtblauw/violette kleurrand het meest naar binnen ligt.
- Het patroon aan één rand is niet regelmatig zoals aan twee randen. De afstandsverhoudingen verlopen volgens een wortelreeks:

$$\sqrt{1}, \sqrt{3}, \sqrt{5}, \sqrt{7} \text{ enz.}$$

De lichtintensiteit van de lijnen neemt volgens dezelfde wortelreeks af.



Het uitvoeren van de objectieve proef met twee versprongen randen vraagt veel precisie en geduld. Zichtbaar wordt dat de tweede rand het patroon oprekt en regelmatig maakt. Plaatst men de randen precies tegenover elkaar, dan krijgt men het gebruikelijke symmetrische beeld. Eén rand geeft dus een duisternispatroon in het lichte gebied, terwijl het donkere schaduwgebied egaal oplicht. Bij het toevoegen van een tweede rand werkt het egaal oplichtende duistere deel op het reeds door de eerste rand ontstane patroon in, zodat dit verder oprekt en regelmatig wordt.



Er zijn nu voldoende proeven beschreven om iets te kunnen zeggen over de dynamiek tussen de licht- en duisternistendens zonder daarbij in modelbeschrijvingen te hoeven vervallen. Licht dat door een nauwe spleet valt wordt als het ware verbrijzeld en ingevangen in de verveelvoudigende en structurerende duisterniswerking. Dit is ook heel goed zichtbaar bij een laser met zijn spikkelbeeld. Met laserlicht kan men veel eenvoudiger rand-effecten verkrijgen. De laser is als lichtbron echter complex.

Gaat men uit van de subjectieve proeven en bedenkt men dat het zien als activiteit van de mens en de activiteit van het stralende licht analoog zijn, dan zou men de fenomenen ook als volgt kunnen beschouwen. Kijken door een *zeer* smalle opening laat de diepte en beeldscherpte verloren gaan. Het karakteristieke van de lichtnatuur, namelijk zijn ruimtelijke werking, gaat door toedoen van de duisterniswerking verloren. Een één- en tweedimensionale werkelijkheid gaat overheersen. Afstands-verhoudingen en beeldverveelvoudiging gaan een doorslaggevende rol spelen.

Heeft men eenmaal ontdekt dat randbeelden samenhangen met structuur, dan vormt het kijken door gaasjes of fijn weefsel als zijde geen verrassing meer. Hoe fijner de structuur waar men door kijkt, des te wijder het versplinterde beeld wordt. Er is een lineaire relatie tussen de maaswijdte en de afstand tussen de opeenvolgende beeldjes. Het kijken door een tralie die een zeer regelmatige structuur heeft, geeft de meest regelmatige beeldverveelvoudiging. Een tralie van een halve cm breedte geeft echter een minder strak patroon dan een tralie van 2 cm breed. Als de traliestructuur dezelfde tralieconstante (maaswijdte) heeft, dan is de wijdte van het patroon even groot, maar de gevormdheid van het patroon hangt ook af van de totale breedte van het tralie. Met tralies en kaarsen, maar ook met een laser en bijvoorbeeld haren, laten zich mooie verveelvoudigde en versplinterde beelden maken.

2.5.2 Practicum kleurgetal

Doel

In dit practicum gaan we het zogenaamde kleurgetal bepalen van blauw en van rood licht.

Methode

We gebruiken het verschijnsel dat er blauwe en rode kleur te zien is als we langs scherpe randen naar een kleine lichtbron kijken.

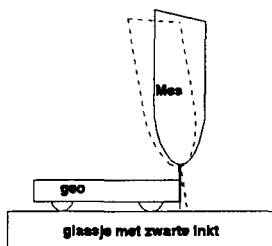
Opstelling

Als lichtbron nemen we een kleine lamp (45W) van de koplamp van een auto. De lamp brandt optimaal op 12V, maar dan kan je er niet meer goed naar kijken, sluit hem dus maar op niet meer dan ca 6 V aan. De gloeidraad moet je verticaal opstellen, evenwijdig aan de richting van de spleten. De spleten maak je zelf op een microscoop-object glaasje. Verder heb je een geodriehoek nodig bij het meten van de afstand van de spleten op dit glaasje. De afstand van de plaats waar je naar de bron staat te kijken tot de bron meten we met een meetband.

De dubbelspleet

Op een objectglaasje, dat je misschien eerst nog even moet schoonmaken, maak je een vlakje van ca 1cm^2 egaal zwart. Daarvoor gebruik je een zogenaamde inktstift; je moet het oppervlak in één keer zwart maken, niet gaan krassen, laat de inkt goed drogen.

Daarna moet je met een vers, scherp breekmesje twee strepen vlak naast elkaar maken. Daartoe leg je een geodriehoek op het glaasje en trek je een snee en daarna met dezelfde stand van de geo nog een snee waarbij je het mesje een paar graden (ca 5°) schuiner houdt. Hoe dunner de sneden en hoe dichters bij elkaar hoe beter het beeld straks wordt.

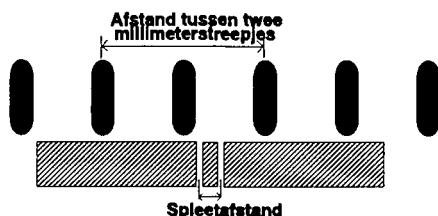


De spleetafstand

De afstand van de spleten kunnen we natuurlijk met een geodriehoek niet goed meten. Daarom zetten we het objectglaasje en de geodriehoek, met de cijfertjes van de geo en de spleten van het glaasje tegen elkaar in de houder van een diaprojector. Als je nu een scherpe afbeelding van beide voorwerpen maakt dan krijg je zoiets als in de figuur hiernaast. Meet nu eerst de afstand tussen 5 millimeterstreepjes van de geo.

5 streepafstandjes komen overeen met: mm
1 streepafstandje komt overeen met: mm

De vergroting van de diaprojector kan je nu berekenen.
De vergroting is maal.



Meet nu in dezelfde afbeelding de afstand tussen de twee spleten.

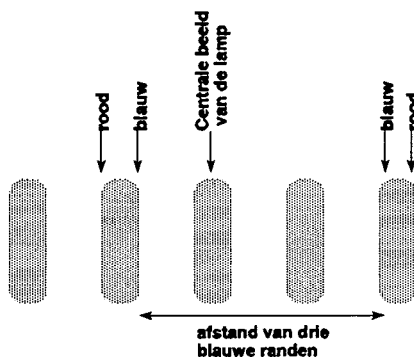
De afstand tussen de twee spleten is in de afbeelding: m

Op het objectglaasje is de spleetafstand dus $d = \dots$ m

De meting

Als je nu 5 à 6 meter voor de bron staat en met de dubbelspleet vlak voor je oog naar de lichtbron kijkt dan zie je een patroon van lichte vlekken, links en rechts naast het beeld van de lichtbron.

De lichtvlekken zijn gekleurd, blauw in het midden en rood aan de buitenkanten. Zie de figuur. Zo kijkend moet je twee grootheden meten. Meet met een meetband de afstand tot aan de lichtbron.



Ik stond kijkafstand = $l = \dots$ m voor de lichtbron.

Verder meet je met een liniaal die vlak bij de lamp gehouden wordt de afstand tussen twee (of liever meer) blauwe randen.

De afstand tussen blauwe randen was m

De afstand tussen twee blauwe randen is dus kleurafstand = $x = \dots$ m

De berekening

Bij elk van de kleuren die bij deze verschijnselen te zien zijn is nu een kleurgetal te berekenen.

$$\text{kleurgetal} = \frac{\text{kleurafstand} \cdot \text{spleetafstand}}{\text{kijkafstand}} = \frac{x \cdot d}{l}$$

Volgens onze berekening is het kleurgetal van blauw:

$$\text{kleurgetal}_{\text{blauw}} = \lambda_{bl} = \dots \text{ m} = \dots \text{ nm}$$

Opdracht

Meet nu ook de afstand tussen de rode vlekken en bereken ook hierbij het kleurgetal.

De afstand tussen rode randen was m

De afstand tussen twee rode randen is dus **kleurafstand** = x = m

Volgens onze berekening is het kleurgetal van rood:

$$\text{kleurgetal}_{\text{rood}} = \lambda_{rd} = \text{..... m} = \text{..... nm}$$

De controle

De kleurgetallen van het licht zijn op veel manieren en nog veel nauwkeuriger als met deze proef te bepalen. Resultaten kan je vinden in Binas tabel 19A. Vul de waarden die je gevonden hebt hieronder in:

$$\text{.....} \leq \lambda_{bl} \leq \text{..... nm} \qquad \text{.....} \leq \lambda_{rd} \leq \text{..... nm}$$

Beschrijf hieronder je mening over de waarden van de kleurgetallen die je zelf gemeten hebt in relatie tot de waarden uit de tabel.

Tot slot

Doe de lamp uit, controleer of de inktstift goed dicht is en ruim alle spullen op waar je ze gevonden hebt. Kijk even na of je naam op deze handleiding staat en lever hem in. Het gebruikte objectglaasje mag je houden of werp het weg.

2.6 Kleurfenomenen in dunne laagjes

Aansluitend aan het onderzoek van de randfenomenen zullen nu een aantal fenomenen besproken worden die samenhangen met het oppervlak. In plaats van randen heeft men nu twee vlakken die zeer dicht aan elkaar grenzen. Ook hier ontstaan regelmatige kleurpatronen, waarbij een ééndimensionale afstand karakteristiek is voor de kleur. Voorbeelden van dergelijke verschijnselen zijn:

- Een druppel olie op beregend asfalt geeft een prachtig concentrisch kleurspectrum. De laagdikte van de olie is daarbij bepalend voor de kleur.
- Een soortgelijk verschijnsel krijgt men door in een ondiepe bak met water met behulp van een pipet wat petroleum-ether te gieten. Dit

verdeelt zich snel en verdampt ook snel. Men krijgt prachtige, grote kleureringen in spectrale kleuropeenvolging te zien.

- Gescheurde kristallen of stukken glas met scheuren laten mooie kleuren aan de scheuren zien.
- Gekleurde ringen ziet men bij twee schoongewreven microscoopglasjes die op elkaar gedrukt worden, zodat ze aan elkaar vastzuigen. Op de glasjes kijken in spiegellicht geeft de contrastrijkste kleuren. Kijkt men dóór de glasjes, dan ziet men de complementaire kleuren. Waar de glasjes het dichtst op elkaar zitten ontstaat een donkere vlek.
- De ringen van Newton kan men tonen door twee iets bolle glasblokken tegen elkaar aan te drukken. Men ziet een reeks gekleurde concentrische ringen.
- Zeepvliezen. Maak zeepsop met wat glycerine, dan zijn de zeepvliezen extra sterk. Met een verhouding water:afwasmiddel:glycerine van 2:1:1 kan men mooie bellen maken. Maak van ijzerdraad een raampje om ze op te spannen. Kijk naar de kleuren tegen een lichte achtergrond en in spiegellicht.
- Een oxide- of aanslaglaagje op een ondergrond geeft ook een kleurenpatroon. Bijvoorbeeld de aanloopkleuren van een koperplaat, die wordt verhit, of een roestvrij stalen pan, waarop na de afwas een vochtig zeepaagje opgedroogd is.
- Zogenaamd optisch glas, vlak of gekromd, wordt op een ondergrond gelegd om de oneffenheid te bepalen. Bij een te oneffen ondergrond ziet men niets. Wordt de oneffenheid kleiner dan ontstaat een gestreept kleurenpatroon, dat breder en wijder wordt naarmate de ondergrond vlakker is.

Typisch voor al deze fenomenen is dat de dikte van het laagje bepalend is voor de kleur die ontstaat. Voor alle stoffen geldt daarbij dat het product van dikte en brekingsindex constant is. Zo kan bij een bepaalde stof aan iedere kleur een bepaalde afstandsmaat toegekend worden. Kleur is niet die afstand, maar komt aan deze afstand tot verschijning. Bij twee glasplaatjes bijvoorbeeld ontstaat er bij een afstand kleiner dan 50 nm zwart, bij een iets grotere afstand onduidelijk transparant en geel/bruin. Vanaf een nog iets grotere afstand wordt het patroon regelmatig, eerst ontstaat violet, dan bij toenemende afstand achtereenvolgens blauw, groen, geel en rood. Wordt de afstand te groot, dan zijn er geen kleuren meer te zien.

Deze proeven tonen iets overeenkomstigs als bij de randfenomenen. Wanneer de afstanden kleiner worden, dan treden er, naast de gewone fenomenen van spiegeling enzovoorts, nieuwe fenomenen op. Er ontstaat kleur- en beeldherhaling. De dynamische wisselwerking tussen

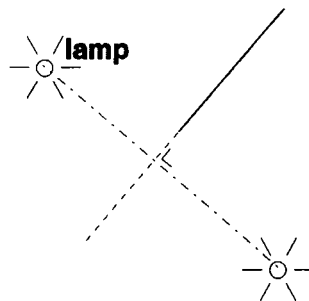
licht en duisternis geeft kleur. Dit thema wordt verder in paragraaf 3.2 uitgewerkt. Bij dunne laagjes, waar twee grensvlakken dicht bij elkaar komen, wordt de duisterniswerking, die uitgaat van deze grenslagen, sterker. Dit is een fenomeen dat typisch met de oppervlakte/rand te maken heeft. Twee oppervlakken, die elkaar dicht naderen, roepen een sterkere werking van de duisternis in verschijning, die vervolgens in wisselwerking treedt met het licht, zodat kleur ontstaat. Neemt men monochromatisch licht, dat zoals we in paragraaf 3.3.5 zullen zien een sterke mate van verduistering vertegenwoordigt, dan treedt de interactie tussen de twee oppervlakken nog eerder in verschijning. Men spreekt dan van coherentie, wat een maat is voor de verduisteringsgraad van de lichtbundel.

Beschouwt men het dunne laagjes fenomeen dynamisch, dan kan men, net als bij de randfenomenen, tot de conclusie komen dat het licht in het laagje wordt "ingevangen" evenals dat bij de versmallende spleet gebeurt. De spleet of het dunne laagje zelf gaat in kleur oplichten, net als een ondoorzichtig materiaal. In deze dynamiek van verduistering en ondoorzichtig worden ontstaat kleur en beeldverveelvoudiging in de vorm van ringen of banden.

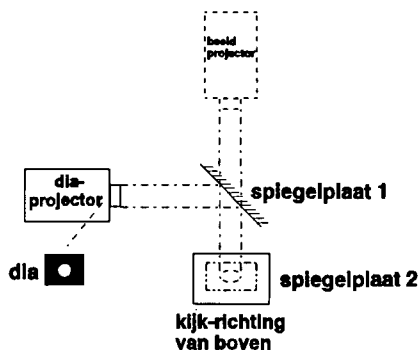
2.7 Polarisatie

Het fenomeen polarisatie kan men aan de leerlingen heel goed demonstreren als een bijzonder soort dubbele spiegeling. De proeven van enkelvoudige spiegeling kunnen er nogmaals aan vooraf gaan. Hier wordt een keuze gegeven van enige proeven die ter inleiding kunnen worden uitgevoerd.

- Kijk in een spiegel naar het spiegelbeeld van een lamp. Deze beeldlamp schijnt alzijdig in de beeldruimte en straalt door het spiegelvlak de reële ruimte in. Dit schijnen door het spiegeloppervlak naar de reële wereld lijkt zonder veel verandering te verlopen. Alleen de intensiteit van het licht is wat afgenomen vergeleken met de reële lamp.



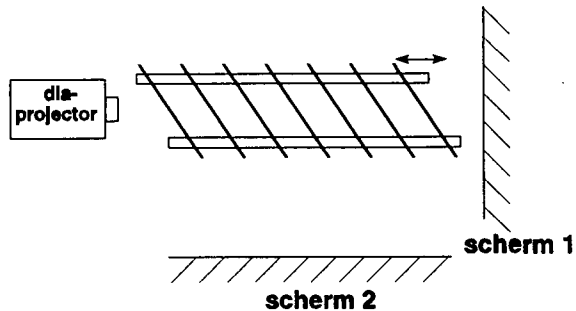
- Plaats nu voor een dia-projector een zwart glanzende kunststof of glazen plaat als spiegel (geen metaalspiegel, een verflaagje op een metalen plaat kan wel). In deze plaat 1 is de beeldprojector te zien, die vanuit de spiegelwereld de reële wereld in schijnt. Houdt men nu eenzelfde glanzende plaat 2 in de ge-



- spiegelde bundel, dan ziet men in deze tweede spiegel de eerste spiegel, met daarin de beeldprojector, die dus door twee oppervlakten naar buiten schijnt. Nu zal onder bepaalde hoeken van spiegel 1 en 2 de beeldprojector nauwelijks meer licht geven. Deze hoeken moet men opzoeken, maar algemeen kan gesteld worden dat spiegel 1 in een verticaal vlak en spiegel 2 in een horizontaal vlak allebei onder een hoek van 50° gedraaid moeten worden. Nauwkeurig kan men dit instellen door met een polaroidfolie in spiegel 1 te kijken en deze zolang te draaien tot de projector zo donker mogelijk is. Schijnt men nu met spiegel 2 op het plafond, dan zal ongeveer recht boven het minst lichte projectievlak te zien zijn. Houdt men nu tussen de spiegels een stukje transparant plastic - verpakkingsmateriaal of plakband - dan treden mooie, zachte kleuren in verschijning.
- Introduceer vervolgens het polaroidfolie, dat ook de mogelijkheid biedt kleuren te laten ontstaan of het lichter of donkerder te laten worden. Een polaroidfolie bestaat uit twee pvc-laagjes met geordende jodiumsulfaatkristallen daartussen. Tegenwoordig kan men ook jodium in het pvc absorberen; de ordening wordt verkregen door het materiaal in één richting op te rekken, waardoor hetzelfde effect ontstaat. Eerst kan men de combinatie van een spiegel en een polaroidfolie tonen, later die met twee polaroidfolies.
- Maak vervolgens een proefopstelling met een overheadprojector, met boven en onder een polaroidfolie. Ertussen houdt men verschillende voorwerpen, zoals een laagje plakband op glas, een micaplaatje, een kristal, een stuk snel afgekoeld glas, een pvc-plaatje waar men een gat in geboord heeft, enzovoorts. Het beeld op het scherm maakt de (spannings)structuur van de transparante materialen zichtbaar. Ook de opstelling met dubbele spiegeling, die zelf ook sterk geordend is, maakt structuren zichtbaar.

Aansluitend kan men laten zien dat een suikeroplossing een kleine verdraaiing van de polarisatiehoek geeft en het verschil tussen links- en rechtsdraaiende suiker en melkzuurbacteriën bespreken.

- Kijk met een kunststof spiegel of polaroidfolie schuin naar een gewone glasplaat, bijvoorbeeld een venster, of naar een stapel glasplaten. De spiegeling en zichtbaarheid neemt sterk af.



- Neem een rek parallelle glasplaten (twee latjes met gleuven, waar de platen in passen, zodat de hoek ten opzichte van de lichtbundel instelbaar is) en schijn er met de diaprojector doorheen. Op scherm 1 is een fel lichtvlak te zien in de vorm van de dia, op scherm 2 ziet men vele vlakken naast elkaar die steeds donkerder worden. Houdt men voor de projector een polaroidfolie, dan zal bij een hoekverdraaiing van 90° scherm 1 of 2 onverlicht zijn. De glasplaten fungeren als spiegels, maar niet alleen het gespiegelde, ook het ongespiegelde licht verandert door het polaroidfolie van karakter. Men kan het polaroidfolie ook voor de schermen houden en over 90° draaien.

Hier ziet men nog duidelijker de polariteit tussen de gespiegelde en de doorgaande bundel. Het woord polarisatie is dan ook heel toepasselijk gekozen. De sterkste polarisatie treedt op wanneer de gespiegelde en gebroken bundel aan het glasoppervlak loodrecht op elkaar staan. De hoek van inval daarbij noemt men de Brewsterhoek.

- Polarisatie aan de hemel kan heel goed waargenomen worden met een polaroidfolie, waar onder 45° een strookje plasticfolie aan vastgeplakt zit. De geringste intensiteitsverschillen kan men zo waarnemen. Aan de blauwe hemel is er altijd een gepolariseerde band te zien, die loodrecht op de as zon-waarnemer staat. De mens staat altijd midden in deze gepolariseerde hemelboog.

- Dubbelbrekend kalkspaat heeft ook een polarisatie-effect. Leg het kalkspaat op de overheadprojector of op een stukje tekst wat je dan dubbel ziet en kijk ernaar door een polaroidfolie die je 90° verdraait.

Polarisatie is een oppervlakte-spiegelfenomeen, dat samenhangt met de brekingsindex. Onder een heel bepaalde hoek treedt verduistering op. Transparante voorwerpen laten daarbij hun optische structuren zien, die samenhangen met de kristalassen van of de spanningen in het materiaal. Hoe krijgt men nu toegang tot het fenomeen polarisatie zonder te vervallen in het denkmodel van golven die loodrecht op elkaar uitgedoofd worden? Hier een poging iets van dit raadsel te ontsluiten.

Wanneer effecten loodrecht op elkaar georiënteerd staan, wordt de duisternis actief en zal de kwaliteit van het licht door toedoen van de duisternis veranderen. Het vierkant en de loodrechte hoek zijn karakteristiek voor het aardse, wat bijvoorbeeld tot uitdrukking komt in de wijze waarop de mens zich tot de aardse gravitatie verhoudt. Dwars of loodrecht op elkaar staan heeft het karakter van een confrontatie, maar houdt tevens het rechtop staan van de mens in.

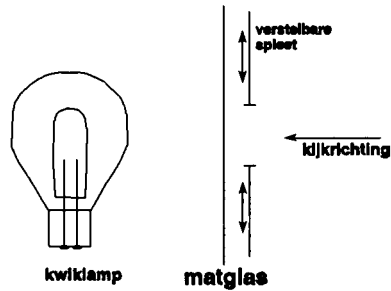
Een spiegeling onder de Brewsterhoek geeft nog geen waarnemingsmogelijkheden, maar de kwaliteit van het licht is al wel veranderd. Het heeft duisternis in zich, echter niet op de dynamische manier waarbij kleur ontstaat. Op een starre, gestructureerde wijze drukt de duisternis zijn stempel op het licht. Dit verliest bij horizontale spiegeling het vermogen om verticaal te kunnen spiegelen. Richting en structuur worden daarmee aan het licht opgelegd. Het polarisatiefenomeen is verwant aan het kristal, waarvan de kristalassen typische duisternis-fixaties zijn van het licht, zodat stof- en lichtstructuren ontstaan.

Een mogelijkheid om het verschijnsel polarisatie met de mens te verbinden kan worden gevonden in de samenhang tussen de individuele ziel als de lichte zijde en de dubbelganger als de duistere zijde van het innerlijk. Ook de dubbelganger wordt men niet gewaar, terwijl deze toch werkzaam is en ons bijvoorbeeld doet hechten aan gefixeerde oordelen.

2.8 Spectroscopie

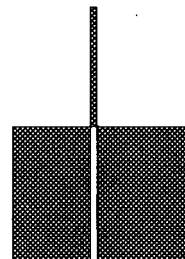
De spectroscopie vormt een zeer uitgebreid thema. Hier kunnen we daarvan slechts een beperkt aantal aspecten behandelen. In aansluiting op de prismafenomenen, waar aan licht/donker grenzen de geel/rode of blauw/violetten kleurranden ontstaan (zie hoofdstuk 3), maakt men de volgende subjectieve proefopstelling.

- De kwiklamp sluit men aan op de netspanning via een smoorspoel. Als verstelbare spleet kan men twee stukken zwart karton nemen. De leerlingen kijken door een prisma naar de randen van de spleet. In de randeffecten die men ziet zijn de kleuren strak van elkaar gescheiden, met abrupte overgangen. Maakt men de spleet smaller dan bewegen de kleurranden eerst naar elkaar toe en vervolgens in elkaar. Langzaam ontstaan donkere gebieden in het spectrum. Bij een zeer smalle spleet houdt men een lijnspectrum over, bestaande uit 5 à 6 lichte lijnen tegen een donkere achtergrond.



- Houd vervolgens, als een verstelbare duisternisspleet, een strook papier voor het matglas en laat die langzaam kantelen. Het spectrum beweegt dan vanaf de rode en violette kant in elkaar en er ontstaat een kleurspectrum met magenta in plaats van groen, maar nu tegen een lichte achtergrond, waardoor het contrast kleiner is.

- Men kan ook een licht- en een duisternisspleet boven elkaar plaatsen door een smal strookje zwart karton boven en twee stukken zwart karton met een smalle spleet ertussen beneden op het matglas te bevestigen. Dit levert, door het prisma gezien, een combinatie van het effect van een lichte en een donkere spleet op. De kleurlijnen die men in het lichte en het donkere spectrum recht boven elkaar ziet zijn precies complementair. Bij drie kleurlijnen krijgt men bijvoorbeeld:

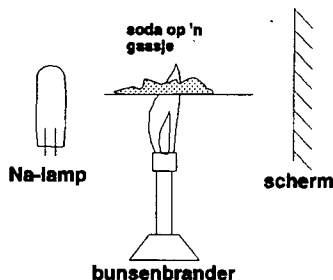


licht	geel	licht	magenta	licht	blauw	licht
donker	violet	donker	groen	donker	rood	donker

Deze typische substantie-beelden kan men verkrijgen met behulp van gasbuizen zoals de beschreven kwiklamp, maar ook door substantie te verbranden en het licht ervan te bekijken in een spectroscop. Dit laatste

wordt veel toegepast bij materiaalonderzoek, zoals bij het vaststellen van legeringen.

- Maak met behulp van een natriumlamp* een schaduw van een sodavlam. De helder blauwe bunzenbrandervlam geeft nauwelijks schaduw op het scherm. Wordt de vlam door verbranding van soda of keukenzout oranje gekleurd, dan ontstaat een schaduw. De vlam wordt ondoorzichtig voor het natriumlicht. Bij deze proef zijn de intensiteitsverhoudingen van belang. De natriumlamp moet fel zijn in verhouding tot de sodavlam.
- Een werkelijk schitterende proef over zwarte vlammen kan hierbij aansluiten. Maak een sodavlam op een gaasje en verduister het lokaal. Schakel vervolgens een sterke natriumlamp aan en belicht de oranje vlam. Deze wordt steeds zwarter gerand naarmate de natriumlamp feller schijnt. Net als een stuk rood papier op een witte muur niet meer zichtbaar is in rood licht, wordt de verduisterde vlam onzichtbaar tegen de donkere achtergrond.
- In het continue spectrum van een gloeilamp kan men vervolgens donkere lijnen maken door een sodavlam vóór de gloeilamp te plaatsen. Met een spectrometer of een spleetopstelling met prisma kan men de donkere lijnen waarnemen. De intensiteitsverhoudingen van gloeilamp en vlam luisteren overigens erg nauw. Het gebruik van de spectrometer is als klasproef niet zo geschikt, omdat iedereen er afzonderlijk door moet kijken.



Overzicht van de waarnemingsresultaten:

1. Gloeiende voorwerpen geven een continu spectrum.
2. Gassen in elektrisch-lichtende toestand en verbrandende substanties geven een lijnenspectrum.
3. Twee lichtende dingen voor elkaar geven een continu spectrum met donkere lijnen.

Aansluitend kan men met de klas in gesprek gaan over de spectraalanalyse van zon en sterren. Deze spectroscopische proeven hebben

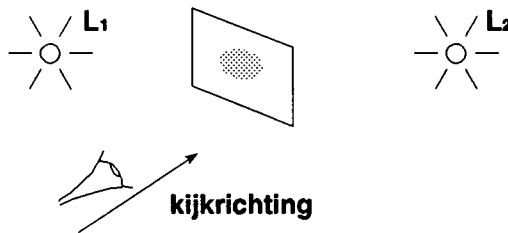
* Straatverlichtingslamp; afgeschreven lampen zijn veelal bij de gemeente, afdeling openbare verlichting, te verkrijgen.

vanaf het einde van de negentiende eeuw een belangrijke bijdrage geleverd aan de waarnemingsmogelijkheden van de kosmos: de astrofysica deed hiermee zijn intrede.

De spectroscopische fenomenen vormen een elegante ingang voor een gesprek over licht en stof. Wanneer een stof op aarde verbrand wordt, dan gaan de stofkwaliteiten als het ware op in het licht. Tevens ontstaan altijd nieuwe stoffen. Men heeft in de negentiende eeuw - de eeuw van het grondvesten van het wetenschappelijk materialisme - als vanzelf aangenomen, dat sterrenlicht afkomstig is van aardse, ruimtelijke substantie en op grond hiervan heeft men sterrenmassa's, stofsamenstellingen en rotaties van planeten uitgerekend. Deze aanname is echter geen waarneembaar feit. Men kan de sterren ook als een wereld van licht zien, waar kwaliteiten geordend zichtbaar worden, zonder dat deze aan stoffelijkheid gebonden zijn. De aarde - en in meer of mindere mate de planeten - vormen de plaatsen waar kwaliteiten in de materie gebannen zijn. Op deze wijze gezien kan men substantie als verdicht licht beschouwen, een gezichtspunt dat Rudolf Steiner meermaals verwoord heeft.

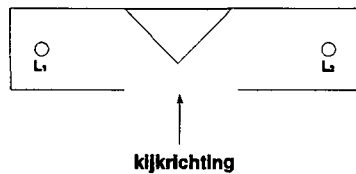
2.9 Lichtintensiteit

Het vergelijken van lichtintensiteiten gaat het eenvoudigst met de vetvlek methode. Doe daartoe een vetvlek op een stuk papier en gebruik dit als vergelijkingsinstrument. Plaats nu twee verschillende lampen tegenover elkaar en houd het papier ertussen. Daar waar de lichtintensiteit van de ene lamp gelijk is aan die van de andere is de vlek onzichtbaar.



Ziet de vlek er donker uit, dan is lamp 1 ter plaatse sterker dan lamp 2, terwijl het omgekeerde het geval is als de vlek lichter is dan de rest van het papier. De verhouding van afstand en intensiteit van lichtbronnen is hiermee goed weer te geven. Vier lampen op een dubbele of negen op een drievoudige afstand geven dezelfde lichtintensiteit als één lamp op enkelvoudige afstand. De lichtintensiteit is namelijk omgekeerd

evenredig met het boloppervlak om de lamp. En dat is evenredig met het kwadraat van de bolstraal.



Een andere vergelijkbare fotometer is de volgende. Maak van karton een lang U-profiel en plaats in het midden een witte papieren driehoek. Ter plaatse van de driehoek maakt men een kijkgat in het karton. De lichtintensiteiten van lampen die links en rechts van de driehoek worden geplaatst laten zich op deze manier goed vergelijken.

De eenheden van lichtsterkte en lichtintensiteit worden meestal niet behandeld. De subjectiviteit van de eenheidsmaat komt hier echter goed naar voren. Vroeger nam men eenvoudig de lichtsterkte van een kaars als eenheid: één candela. De verlichtingssterkte op een bepaalde plaats in de lichtruimte wordt uitgedrukt in lux en als volgt berekend:

$$\text{verlichtingssterkte (lux)} = \frac{\text{lichtsterkte (candela)}}{\text{afstand}^2}$$

De lichtsterkte van 1 candela is volgens de definitie van 1960: 1 candela is de lichtsterkte van een zwart oppervlak van $1/60 \text{ cm}^2$ ($1 \frac{2}{3} \text{ mm}$) bij een temperatuur van 1770°C (de temperatuur van smeltend platina).

Een autolamp van 50 Watt heeft een lichtsterkte van ongeveer 16.000 candela. Op 9 m is de verlichtingssterkte ongeveer:

$$\frac{16.000}{9^2} = 200 \text{ lux}$$

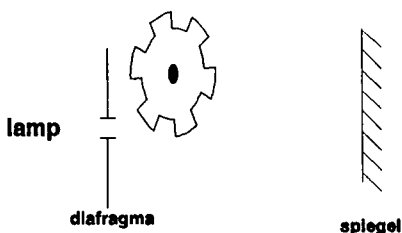
200 lux is de verlichtingssterkte voor ruimtes waar gewerkt wordt.

2.10 Lichtsnelheid

Reeds voordat de Deense astronoom O. Rømer (1644-1710) de snelheid van het licht berekende uit de omlooptijd van de maan Io van Jupiter, werd de gedachte al geaccepteerd dat licht een zich in de ruimte

uitbreidend verschijnsel is. Eerst werd daarbij nog gedacht aan de beweging van een onzichtbare, maar wel ruimtevullende ether, later dacht men in termen van de beweging van deeltjes of de uitbreiding van golven. Roemer baseerde zijn berekeningen op metingen gedurende zes maanden aan de omlooptijd van het maantje Io. Omdat gedurende deze tijd de afstand Aarde-Jupiter veranderde was de omlooptijd, gemeten aan het verschijnen en weer verdwijnen van Io achter Jupiter, niet constant. Dit leverde een tijdsverschil van ongeveer 1 sec op.

Er zijn meerdere manieren om de lichtsnelheid te bepalen. Slechts één daarvan zal hier besproken worden, omdat de proefopstelling duidelijk laat zien waar het eigenlijk om gaat. De proef werd in 1849 uitgevoerd door A. Fizeau (1819-1896).



Het licht van de lamp wordt gericht op de getande rand van een zeer snel draaiend wiel. De tanden dekken het licht af; door de openingen schijnt het op een spiegel die 9 km verderop zo staat opgesteld, dat hij het licht terugspiegelt op de achterkant van het wiel. Uit het faseverschil tussen doervallend en teruggespiegeld licht is de lichtsnelheid af te leiden. Steeds geavanceerdere proefopstellingen hebben tenslotte geresulteerd in een waarde van deze snelheid van 299.792,5 km/s.

De vraag blijft wat er nu met deze snelheid beweegt. Het resultaat van de proef van Fizeau leidt niet noodzakelijk tot de voorstelling van het licht dat zich stuwend door de ruimte voortplant, als water of wind. Bij substanties kunnen we van stroming spreken, maar bij licht lijkt dat niet de juiste uitdrukking. Wanneer in de proef van Fizeau het licht door een opening van het wiel schijnt, ontstaat achter het wiel een lichtruimte. Wanneer het licht vervolgens wordt afgedekt, verdwijnt die lichtruimte en ontstaat een donkerruimte. Het ontstaan van een lichtruimte - of van een lichtveld - is iets anders dan het uitstromen en voortbewegen van materie. De dynamiek van een veld is ontstaan en vergaan. Het ontstaans- en vergaansproces van het veld speelt zich af aan het front, de grens van licht en donker. Daar vindt de actualisering van de lichtruimte plaats, of van de donkerruimte. En wel met een snelheid van 299.792,5 km/s.

Dat de lichtsnelheid afhankelijk is van het (doorzichtige) medium, sluit volledig aan bij deze zienswijze. Niet de stuwende snelheid van een object speelt een rol, maar de actualiseringssnelheid van de lichtruimte. Men kan dat ook omschrijven als de overgang van een onruimtelijke, een potentiële situatie naar een ruimtelijke reële. Deze overgang wordt beïnvloed door de ruimtelijke condities waarin het lichtveld ontstaat. De optische dichtheid van het medium is daarvoor een bepalende factor.

Bij alle proeven die samenhangen met de lichtsnelheid kan men spreken over het creëren en afbreken van lichtruimtes. Vormt men hieruit de voorstelling van licht dat zich vanuit een onruimtelijke sfeer met de ruimte verbindt, dan wordt de lichtsnelheid ontdaan van zijn verplaatsingskarakter en uitdrukking van een intrinsieke beweging. Het is te vergelijken met het ontwaken van een mens: ook de verbinding van het uit het onruimtelijke komende bewustzijn met het ruimtelijke fysieke lichaam voltrekt zich met een bepaalde (zij het per persoon verschillende!) snelheid.