NATUURKUNDE

- Leerstof voor klas 10, 11 en 12
- Achtergronden en ideeënvorming

JAN VAN GILS
KEES VEENMAN
BEN GEELS

VRIJ PEDAGOGISCH CENTRUM

LEERPLAN WERKBOEK 10

NATUURKUNDE KLAS 10 / 11 / 12

VPC

NATUURKUNDE

Leerstof voor klas 10,11 en 12
Achtergronden en ideeënvorming

Resultaten
van het ontwikkelingsprojekt
NATUURKUNDE VRIJE SCHOLEN

2e Deel

Jan van Gils
Kees Veenman
Ben Geels

VPC

Auteurs: Jan van Gils, Kees Veenman, Ben Geels
Eindredactie: Peter Schukking
Begeleiding: Rob de Kievit, Rupert Genseberger, Evert van Malkenhorst
Tekenwerk: Ben Geels
Tekstverwerking: Mathilde Köiter
Omslagontwerp: Peter Vormer
Typografie omslag en titelblad: Peter de Gruyl
Druk: Brink, Soest

Uitgegeven en verkrijgbaar bij:
Stichting Vrij Pedagogisch Centrum
Hoofdstraat 14b, 3972 LA Driebergen, tel. 0343-536066

© Instituut voor Leerplanontwikkeling, Enschede

Deze uitgave is financieel ondersteund door de Iona Stichting te Amsterdam.

Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm, geluidsband, electronisch of op welke andere wijze dan ook en evenmin in een retrieval system worden opgeslagen zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van het instituut.

ISBN 90-800739-5-4

september 1998

OVERZICHT VAN DE INHOUD

Voorwoord 5

KLAS 10

1. Inleiding 9
2. Beweging 13
3. Krachten 46
4. Dynamica 72
5. Vertelstof in de 10e klas 108

KLAS 11

1. Inleiding 125
2. Voorbeeld van de behandeling van elektriciteit in de pedagogische praktijk 131
3. Begrips- en ideeënvorming rond de lesstof 144
4. Toepassingen 193
5. Ideeënvorming en achtergronden voor de docent 204

KLAS 12

1. Inleiding 233
2. Lichtleer 245
3. Kleurenleer 305
4. Achtergronden en ideeënvorming ten behoeve van de docent 334

Aanbevolen literatuur 359

Een gedetaileerde inhoudsopgave per klas gaat aan elk betreffend deel vooraf.

VOORWOORD

Toen in september 1994 de eerste publicatie van het ontwikkelingsproject Natuurkunde Vrije Scholen het licht zag, kon in de inleiding al gewag gemaakt worden van het vervolgproject dat inmiddels gestart was en tot een tweede publicatie moest leiden. Dat daarmee nog een traject van vier jaar te gaan was, hadden de betrokkenen toen niet ingeschat; de realiteit van het leven bleek echter zo. Welnu, deel II ligt ter tafel, en dat betekent dat een onderzoeksproces van ruim twaalf jaar zijn eindpunt heeft bereikt. Een proces dat voor de onderzoekers leerzaam was en dat een vruchtbare samenwerkingsrelatie heeft opgeleverd tussen de Vrije Schoolbeweging en het Instituut voor Leerplanontwikkeling SLO.

Het project Natuurkunde Vrije Scholen beoogde een impuls te geven aan het natuurkundeonderwijs in de Vrije Scholen in Nederland, met een mogelijke uitstraling naar het reguliere onderwijs. Hoe impulseer je het onderwijs? In principe altijd door mensen enthousiast te maken. Mensen die onderwijs geven en mensen die onderwijs ontvangen. Leraren die opnieuw enthousiast worden voor hun vak (het mooiste vak dat bestaat!), daarin op nieuwe ideeën gebracht worden, nieuwe ontdekkingen doen en nieuwe mogelijkheden zien om het met de leerlingen te exploreren. En leerlingen die door het enthousiasme van hun leraren aangestoken worden om zelf aan de slag te gaan en de wereld te verkennen. Zodoende wordt onderwijs vruchtbaar, want worden capaciteiten gewekt en gemobiliseerd, die blijvend in het leven kunnen worden ingezet.

Het Vrije Schoolonderwijs werkt op deze basis. Dat vereist van degenen die opereren in dit veld continue actie. Zowel in het hanteren van de concrete lessituaties als in het telkens weer aanboren van de bronnen. Die bronnen leveren de ideeën, vakinhoudelijk en pedagogisch, en inspireren tot nieuwe werkwijzen. In de praktijk ontstaat dan, uit de inspanning om de ideeën in de wisselwerking met de leerlingen te realiseren, het pedagogisch moment. Die ervaring, dat gouden moment, ontsteekt bij de leraar iedere keer weer het vuur van het enthousiasme dat hem in staat stelt zijn werk vol te houden.

Dit boek is zo'n inspiratiebron voor natuurkundeleraren. Het is de bedoeling dat zij eruit putten wanneer ze daar aan toe zijn. En het is te hopen dat zij er dan ideeën uit opdoen die ze voor hun lessen kunnen gebruiken. Het is dus absoluut geen voorgeschreven leerplan, noch een vastgelegde methode. Het is een bron die ter beschikking staat. Of, zoals het in de inleiding van deel I werd gezegd, het is als zaad, op zichzelf tot niets

in staat, maar vol potentie wanneer het in een vruchtbare bodem wordt opgenomen.

Het onderwijs is alom in beweging. Het Vrije Schoolonderwijs is momenteel zelfs in heftig vaarwater geraakt. Het zal in de komende jaren grondig geëvalueerd en omgebouwd moeten worden, waarbij aan beproefde inhouden nieuw vormgegeven zal moeten worden. Dat was bij het schrijven van dit boek niet voorzien. Komt het daarom te laat en is het bij zijn verschijnen al achterhaald?

In bepaalde opzichten misschien wel. Misschien klinkt er nog wel een te zwaar accent in door op de klassikale, docentgestuurde aanpak. En misschien biedt het te weinig expliciete aandacht aan didaktische vormen voor het omgaan met verschillen tussen leerlingen. En zeker zal de introductie van examens in de hoogste klassen van de Vrije School een bezinning op en herordening van de leerstof noodzakelijk maken. Maar daarmee is de waarde van dit boek niet aangetast, er is alleen een bepaalde beperktheid mee aangeduid. Juist omdat het bij het Vrije Schoolonderwijs niet gaat om een vastgelegd leerplan en een vastgelegde methode, maar om de eigen creativiteit van de leraar bij de inrichting van zijn onderwijs voor die bepaalde groep leerlingen, kan de inhoud van dit boek als inspiratiebron blijven dienen. Misschien, kunnen we zelfs zeggen, komt het precies op tijd: juist nu is er, meer dan ooit, behoefte om bij de keuzes die we voor de toekomst moeten maken uit de ervaringen van het verleden te kunnen putten. Moge dit boek die functie vervullen!

INHOUDSOPGAVE 10e KLAS

		pag.
1.	Inleiding	9
	1.1 Natuurkunde in de 10e klas	9
	1.2 Periodeopbouw	10
2.	Beweging	13
	2.1 Inleiding. De eenparige rechtlijnige beweging	13
	2.2 De rondgaande beweging	17
	2.3 De ritmische beweging	19
	2.4 Combinaties van bewegingen	20
	2.5 De golfbeweging	28
	2.6 De valbeweging	31
	2.7 Achtergronden en ideeënvorming	37
	2.7.1 De kennisweg	37
	2.7.2 Beweging en de cyclus van het kenproces	39
	2.7.3 Snelheid en versnelling	40
	2.7.4 Beweging als autonome werkelijkheid	41
	2.7.5 Resonantie	43
	2.7.6 De eenheid van afstand	44
3.	Krachten	46
	3.1 Algemeen: hefboom, balans, diverse toepassingen	46
	3.2 Het samenstellen en ontbinden van krachten	54
	3.3 Kracht en vormverandering	57
	3.4 Achtergronden en ideeënvorming	60
	3.4.1 Open en gesloten systemen	60
	3.4.2 De vakwerkbrug als toepassing van een gesloten krachtensysteem	62
	3.4.3 Kracht, vormverandering, krachtenveld	65
	3.4.4 De meervoudige aard van het krachtbegrip	68
	3.4.5 Techniek in relatie tot de mens	69
	3.4.6 De eenheid van kracht	71
4.	Dynamica	72
	4.1 Inleiding	72
	4.2 Toepassingen van vermogen	73
	4.3 Massa	74
	4.4 Rotatie	77
	4.5 Energie	80

4.6 Achtergronden en ideeënvorming 82
4.6.1 De relatie tussen kracht en beweging 82
4.6.2 De relatie tussen gravitatieversnelling, massa en gewicht 85
4.6.3 Massa en snelheid 88
4.6.4 Bewustzijn en materie 89
4.6.5 De aarde als samengesteld organisme 92
4.6.6 Aarde tussen zon en maan 94
4.6.7 Kepler en Newton 98
4.6.8 Het is-gelijk teken 100
4.6.9 Vectoren in de ruimte 104

5. Vertelstof in de 10e klas 108
5.1 De vertelcultuur in de Vrije School 108
5.2 Het vertellen in de 10e klas 109
5.3 De geboorte van de moderne wetenschap 110
5.4 Galileo Galileï 112
5.4.1 Levensloop 112
5.4.2 Galileï's experimenten en zijn verbindende denk 114
5.5 Nicolaas Cusanus 116
5.5.1 Leven en werk 116
5.5.2 Sociaal streven en kennisleer 119

1. INLEIDING

1.1 Natuurkunde in de 10e klas

In de natuurkundeperiodes die van jaar tot jaar gedurende drie tot vier weken gegeven worden, springt de 10e klas periode eruit door het feit dat de lesstof sterk geënt is op de wiskundig abstracte beschrijving. De keuze van de lesstof berust in het Vrije Schoolonderwijs op de antroposofische ontwikkelingspsychologie van de opgroeiende mens. Zie deel I, hoofdstuk 1 en 2. Voor de 10e klas (de leerlingen zijn dan ongeveer 16 jaar) betekent dit dat het spanningsveld tussen gevoel en verstand het strijdtoneel is waarop het leerproces plaatsvindt. In de gevoelsbeleving verbindt de mens zich met zijn ervaringen, terwijl daar met het abstracte denken afstand van genomen wordt. Deze twee zieleactiviteiten in een ritmische afwisseling te oefenen vormt het ontwikkelingsthema van de 10e klas. De natuurkunde biedt daarbij met name gelegenheid om het abstracte denken te ontwikkelen, en wel aan de hand van het onderwerp mechanica: een gebied waar de mens zich van nature niet gevoelsmatig toe verhoudt. Andere onderwerpen, zoals warmte en licht, lenen zich hier minder voor, omdat de warmte- en lichtfenomenen sterker aan het gevoel appelleren c.q. tot beschouwing aanleiding geven.

Het aanspreken van denken, voelen en willen is op alle leeftijden van belang. In de 9e klas (14 à 15 jarigen) vindt dit plaats door de thema's warmte en elektriciteit te behandelen. De warmteverschijnselen zijn voor de mens direct beleefbaar, terwijl de elektromagnetische verschijnselen in eerste instantie ver van hem afstaan; beide bevatten een vorm van polariteit. Met het intreden van de puberteit vindt er een duidelijke differentiatie in de zielestructuur van de opgroeiende mens plaats in twee polaire richtingen. Het intellectuele denken ontwaakt, maar tevens wordt de puber gevoelig voor zijn eigen wilsintenties en ontwaakt het geslachts- en driftleven. De oordeelsvorming laveert tussen die twee uitersten.

In de loop van de 10e klas komt deze differentiatie tot een zekere afronding. Nadat in de 9e klas de nadruk lag op de polariteit van denken en doen, ontwikkelt het voelen zich nu zodanig dat het zich met deze beide kan gaan verbinden. Een nieuw gevoel voor schoonheid ontstaat als het gevoel zich met het handelen verbindt. Als bijvoorbeeld bij het maken van een werkstuk het handelen wordt doorvoeld, dan ontstaat in de ziel de behoefte het esthetische element te verzorgen. Het oordeelsvermogen ontwikkelt zich doordat voelen en denken op elkaar betrokken worden. Er ontstaat een differentiatie tussen verstand en gemoed. Men kan ook zeggen dat het willend-denkende aspect en het voelend-inlevende aspect in de ziel naast elkaar komen te staan. Beide vragen om ontwikkeling. Binnen het pro-

gramma van de 10e klas vindt een doelbewuste afwisseling plaats tussen vakken als nederlands (poëzie) en geschiedenis (oude culturen), waar vooral aan het voelende/belevende vermogen van de leerlingen wordt geappelleerd, en vakken als natuurkunde (mechanica), aardrijkskunde (weerkunde) en scheikunde (kristallografie) die meer het willen en denken aanspreken.

1.2 Periodeopbouw

De mechanicaperiode zou, in aansluiting op de ontwikkelingspsychologische overwegingen die hiervoor uiteengezet zijn, drie thema's kunnen omvatten:

kinematica (+ geluid) - statica - dynamica

De kinematica of bewegingsleer is verwant aan het voorstellingsleven van de mens, terwijl de statica of evenwichtsleer van krachten meer verwant is aan het spier- en ledematenstelsel. Krachten zijn niet voorstelbaar, maar alleen ervaarbaar, zoals wij ons er ook niet van bewust zijn hoe onze wil tot stand komt, maar deze wel ervaren. Het verloop van een gedachtengang echter kunnen wij bewust volgen. Zo kan ook een zuiver bewegingsvraagstuk geheel denkend, vanuit de voorstelling, worden opgebouwd. Steiner bespreekt in zijn eerste natuurwetenschappelijke cursus* het voorbeeld van het foronomische bewegingsparallellogram versus het krachtenparallellogram. Ook hier komt deze tegenstelling overeen met de polariteit tussen de voorstellende activiteit van het denken en de activiteit van de wil in de stof. De dynamica is een combinatie van beweging en kracht. Menskundig laat dit thema zich vergelijken met het voelen van de mens dat tussen denken en willen in staat. Antipathie en sympathie, als hoofdgebaren van het gevoelsleven, zijn ook verwant aan denken en willen. Zoals het voelen een brugfunctie heeft tussen denken en doen, zo slaat de dynamica de brug tussen kinematica en statica.

natuurkundig:	menskundig:
kinematica	***voorstellen, denken***
↑	↑
dynamica	***voelen***
↓	↓
statica	***handelen, willen***

* Rudolf Steiner: *Geisteswissenschaftliche Impulse zur Entwickelung der Physik* (1. naturwissenschaftlicher Kurs).

De periode kan men het beste beginnen met wat voor de leerlingen het meest toegankelijk is: de kinematica (en eventueel geluidsleer), maar beperking is hier aan te bevelen. De praktijk is vaak dat er op de kinematica teveel nadruk wordt gelegd, ten koste van met name de dynamica. Vanuit de hiervoor genoemde overwegingen is het echter juist van essentieel belang dat de polariteit beweging-kracht aan de orde komt, alsmede het samengaan van beide in de dynamica. De tegenstelling van bewustzijn en materie die hiermee samenhangt is te wezenlijk om in de periode niet tot zijn recht te laten komen. Steiner wijdt nog geen jaar na de eerste natuurwetenschappelijke cursus een tweede voordrachtenserie aan dit thema*, niet omdat dit zo'n interessant wetenschappelijk onderwerp is, maar omdat de tijd vraagt om begrippen en voorstellingen die de relatie tussen mens en natuur herstellen.

Het voorstellende denken van de mens hangt nauw samen met het zien. Zoals de ogen een lichtwereld buiten ons waarnemen, zo neemt ons denken een geestelijke lichtwereld waar. Voor zover ons denkende bewustzijn zich naar buiten richt en zich verbindt met wat de zintuigen ons aanbieden, vindt dit vooral via de ogen plaats. Daartegenover staat dat de mens zich lichamelijk nauwelijks gewaar wordt. Van het spiersysteem en de orgaanprocessen zijn we ons volledig onbewust, terwijl ons hele lichaam drager van ons bewustzijn is.

Als kijkend wezen leven wij in de ruimte, waar alles zich naast elkaar afspeelt, maar de processen in ons lichaam en in de aarde blijven ons grotendeels verborgen. Natuurlijk kunnen we de aarde en ons lichaam waarnemen, maar we blijven toch buiten de dingen, zoals ook het licht ons alleen de buitenkant van de dingen laat zien. Wil men toch in de stoffelijke wereld doordringen, dan gaat dit gepaard met bewustzijnsverlies: wanneer er teveel druk of een te harde stoot op ons lichaam plaatsvindt kan volledige bewusteloosheid optreden. Via het tasten kunnen we de stoffelijke hoedanigheid van een voorwerp, plant, dier of mens in zijn lichamelijkheid waarnemen, maar het bewustzijn van deze gewaarwording is dof. Materie zuigt het bewustzijn weg, licht roept het bewustzijn op. Leven in het licht, in kleurgeschakeerde beelden en in beweging, is voor ons vanzelfsprekend. Afdalen in het gebied van de materie en krachten is moeizaam voor de mens. Steiner geeft in beide bovengenoemde voordrachtenreeksen aan, dat door een versterkt en verdiept bewustzijn te ontwikkelen de mens zichzelf kan doorgronden en daarmee de mogelijkheid verwerft om werkelijk in de natuur door te dringen en in een wereld van krachten en processen staande te

* Rudolf Steiner: *Geisteswissenschaftliche Impulse zur Entwickelung der Physik* (2. naturwissenschaftlicher Kurs).

blijven. Dan is de brug geslagen tussen het voorstellende bewustzijn en de ondoorgrondelijke natuur.

Door beide thema's, bewegingsleer en krachtenleer, naar hun wezen te karakteriseren en te behandelen wordt een bijdrage geleverd aan de verdere ontwikkeling van de mens in deze tijd. In zekere zin is de 10e klasser qua ontwikkeling aangekomen op het ontwikkelingsniveau van de huidige mensheid. Het opgroeiende kind doorloopt in bepaald opzicht de ontwikkelingsfasen van de vroegere mensheid en komt op zestienjarige leeftijd op het huidige mensheidsniveau aan. De 10e klasser lijkt dan ook geschikt om de maatschappij in te trekken, maar de capaciteiten om aan de toekomst van mens en maatschappij te werken sluimeren nog. In de 11e en 12e klas ontwaakt het ideaalbeeld "mens", waardoor de leerlingen vaardigheden en een innerlijke houding kunnen ontwikkelen om mee te werken aan maatschappelijke omvormingen. Hier komt de maatschappelijke taak naar voren die in de pedagogie verscholen ligt: het actualiseren van de intenties die leerlingen meebrengen. Door juist op de leeftijd van de 10e klasser de polariteit van beweging en kracht, van bewustzijn en materie, te behandelen worden toekomstkrachten gewekt, omdat in vele leerlingen in deze tijd de intentie leeft tot zelfkennis te komen en de processen in de wereld van binnenuit te benaderen. Nogmaals schematisch deze polariteit in zijn diverse aspecten:

beweging	***bewustzijn***	***zintuigen***	***oog***	***zien***	***licht***	***ruimte***
⇕	⇕	⇕	⇕	⇕	⇕	⇕
kracht	***materie***	***ledematen***	***spier***	***tasten***	***gravitatie***	***aarde***

Tussen deze twee polen staat de dynamica. Die verbindt beide. In de periode is de dynamica het beeld voor het midden, waar de ontwikkeling van de mens uiteindelijk in kan culmineren. In de dynamica wordt het hoogste begrip uit de bewegingsleer, de versnelling, verbonden met het diepste begrip uit de stofwereld, de massa. De dynamica vormt de kroon op het periodethema.

Bij een periodeduur van vier weken is onderstaande indeling een werkbaar uitgangspunt:

1e week: Bewegingsleer: rechte, rondgaande en ritmische beweging.
2e week: Voortzetting bewegingsleer: vrije val en versnelde beweging.
3e week: Krachtenleer, momenten.
4e week: Dynamica, kracht, versnelling en massa.

2. BEWEGING

2.1 Inleiding. De eenparige rechtlijnige beweging

Vanuit pedagogische overwegingen zou men met de behandeling van de ritmische beweging kunnen beginnen, om daarna te vervolgen met de rondgaande en rechtlijnige beweging. Men spreekt dan de leerlingen in het ritmische midden aan en werkt van daaruit naar de polariteiten recht en rond, ofwel denken en willen. Het is echter ook mogelijk met het heldere rechtlijnige denken te beginnen, het ronde daartegenover te plaatsen om daarna tot een synthese te komen in de ritmische beweging. Deze weg zal hier gevolgd worden. Een praktisch voordeel hiervan is dat tijdens de bespreking van de ritmische beweging, zoals onder andere bij geluid, het maken van opgaven over snelheid, afstand en tijd verder geoefend kan worden, zodat een goede basis ontstaat voor de behandeling van de vrije val en de versnelde beweging.

Bij het bespreken van een onderwerp in de klas is het altijd weer een uitdaging antropomorf te werk te gaan. Wat sluit direct bij de mens aan en wat zijn afgeleide verschijnselen? De S.I. eenheden afstand, tijd en massa zijn geen primaire belevingen: binnen de mechanica is beweging het meest aan de mens verwante fenomeen. Het karakter van beweging ligt vervat in de begrippen snelheid en snelheidsvariatie. Vanuit deze overwegingen is het dus vanzelfsprekend de periode in de meest brede zin van het woord met beweging te beginnen. We kunnen daarvoor naar de oereigen bewegingen binnen de natuurrijken kijken:

mens:	gemotiveerde beweging van binnen uit, actief
dier:	instinctieve beweging
plant:	groeibeweging van buitenaf, passief
mineraal:	ondergane beweging

Dit overzicht kan verder uitgewerkt en besproken worden. Zo kent de mens alle vier bewegingstypen. Hij kan handelen vanuit een motief, maar ook vanuit z'n instincten of driften. Ook groeien zijn haren zonder dat hij zich daar actief voor hoeft in te spannen en kan hij zich laten voortbewegen door een trein. Tevens kan men zielebewegingen bespreken: denkbewegingen (een gedachtengang of de vlucht van de gedachten), gevoelsbewegingen (sympathie en antipathie, zachtmoedig, openhartig) en wilsbewegingen (moed, brutaliteit). De polariteit binnen de groeibeweging van de plant, het uitbreiden en samentrekken, zijn hier ook te behandelen, evenals de verschillende bewegingen van dieren die door middel van toneelspel getypeerd kunnen worden.

Na een dergelijke inleiding is het voor velen een opluchting dat de beweging van de dode stof het hoofdonderwerp van de periode wordt en dat de bewegingen van de overige natuurrijken te ingewikkeld zijn om mechanisch te bekijken of te berekenen. Zelfs de beweging van lucht of water komt op de tweede plaats, we gaan het meest passieve bekijken: bewegingen van vaste voorwerpen. Geen blaadjes papier of piepschuim, maar stenen, kogels, e.d. We trekken ons zover uit de natuur terug, dat we geheel in de voorstelling kunnen blijven, doordat we ons de allereenvoudigste beweging voorstellen. Hiervoor kiezen we de constante rechtlijnige beweging, die in de natuur niet voorkomt en technisch zeer moeilijk te realiseren is. Het is een geïdealiseerde beweging, waarbij men een bewegend punt in de voorstelling neemt.

Om nog duidelijker te laten uitkomen dat we ons in deze voorstelling verregaand van de natuur distantiëren, vraagt men een leerling bijvoorbeeld te beschrijven, hoe zijn reis naar school verloopt. Dan abstraheren in plaats van idealiseren we de reis tot een beweging die constant én rechtlijnig verloopt. Vervolgens leggen we maar één aspect van deze voorgestelde, volledig van de natuur gereduceerde beweging vast en dat is de snelheid. De beleefbare beweging met al z'n snelheidsvariaties, waar de mens met zijn beleving direct mee verbonden is, moeten we goed onderscheiden van de kwantitatieve snelheid. Deze laatste wordt bepaald door het tijdsverloop en begin- en eindpunt van de verplaatsing vast te leggen. In de beweging zelf ben je dan niet geïnteresseerd, maar alleen in het geabstraheerde begrip gemiddelde snelheid. We meten afstand en tijd als buitenstaanders die niet deelnemen aan het proces zelf. Men kan als voorbeeld een wielerwedstrijd of iets dergelijks nemen en de sporter vergelijken met de jury. We streven er in deze periode naar om steeds meer jury te worden. De werkelijke beweging is nauwelijks vast te leggen of te berekenen. De geabstraheerde rechtlijnige, constante beweging is heel eenvoudig te berekenen, maar nauwelijks te realiseren.

Een voorbeeld. Eén van de leerlingen moet 6 km fietsen en doet daar 20 minuten over. Zijn gemiddelde snelheid is dan:

in 20 min 6 km
in 10 min 3 km
in 60 min 18 km.

In de helft van de tijd legt de leerling 3 km af: dit is een interpolatie. We extrapoleren ook door te zeggen: zou de leerling één uur lang doorfietsen, dan zou er 18 km afgelegd zijn. We concluderen dat de gemiddelde snelheid dus 18 km/h bedraagt. Dit geldt ook voor de eerste 10 min! Dus:

$$\text{de gemiddelde snelheid} = \frac{\text{totale afstand}}{\text{totale tijd}}$$

in formule: $v = \frac{s}{t}$ waarbij: v = velocitas, snelheid

s = spatio, afstand
t = tempus, tijd

Laat de leerlingen een *s-t* grafiek maken, bijvoorbeeld van hun reis van huis naar school, en de gemiddelde snelheid berekenen.

Na deze inleiding, waarbij reeds op een elementaire wijze het wiskundig formuleren verbonden wordt met de natuurkundige verschijnselen, een van de hoofduitgangspunten van deze periode, onderzoeken we de verschillende soorten bewegingen. In het boek van von Baravalle *Physik als reine Phänomenologie* worden tal van voorbeelden gegeven van technische bewegingen. Er zijn drie primaire bewegingen te onderscheiden:

rond: cirkel, ovaal, spiraal, cardioïde
ritmisch: lemniscaat, slinger, sinusoïde
rechtlijnig: voortgaande beweging, vrije val.

In de natuur is de ritmische beweging regel en de rondgaande uitzondering. Het lopen van de mens is een mooi voorbeeld van een ritmische beweging. De techniek laat vooral rondgaande beweging zien, terwijl daar de ritmische beweging eerder uitzondering is. Deze drie primaire bewegingen zijn qua vorm ook in de lichamelijke gestalte en qua zielebeweging in de psyche van de mens terug te vinden: hoofd, romp en ledematen van het lichaam, verbonden met de zielefuncties denken, voelen en willen. Het hoofd wordt gekenmerkt door de ronde vorm, in de borst overheerst de ritmische vorm (ribben) en beweging (ademhaling en bloedsomloop), in de ledematen overheersen de rechte vormen. Op het psychische vlak beleven we aan het denken het rechte element (gedachtengang), het voelen is een ritmisch gebeuren dat zich afspeelt tussen in sympathie verbinden en in antipathie afstand nemen, in het willen kunnen we het ronde, gebalde element beleven. In schema:

	lichaam	*psyche*
rond	hoofd	willen
ritmisch	ribben, adem, hart	voelen
recht	ledematen	denken

Bovenstaand overzicht kan in de klas onderzoekend opgebouwd en met vele voorbeelden omkleed worden.

Opgaven

De opgaven in dit boek zijn bedoeld als voorbeelden, hoe men van een ervaarbare situatie uitgaand geleidelijk aan tot abstractie komt. Laat om te beginnen leerlingen bijvoorbeeld de tijd opnemen van hun dagelijkse reis van huis naar school en met een kilometerteller op de fiets de afstand. Gevraagd wordt dan de gemiddelde snelheid te bepalen.

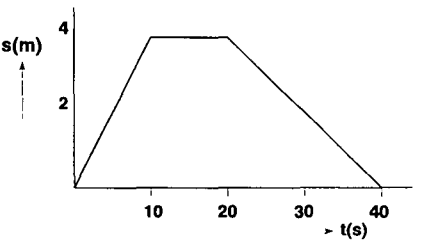
1. Annet reist van huis naar school. Ze moet eerst 15 km met de bus, dat duurt 20 minuten; daarna moet ze nog 5 km fietsen, dat duurt ook 20 minuten.
   a. Bereken de gemiddelde snelheid van de bus.
   b. Bereken ook de gemiddelde fietssnelheid.
   c. Bereken ook de gemiddelde snelheid van de hele reis.
   d. Teken van deze reis een *v-t* en een *s-t* grafiek.

2. Een marathonloper loopt de 42 km in 2 uur en 6 minuten.
   a. Hoe groot is zijn gemiddelde snelheid in km/uur en in m/s ?
   b. Kun je deze hardloper op de fiets bijhouden?

3. Lucht heeft bij windkracht 6 een snelheid van 13 m/s.
   a. Als deze windsnelheid 3 uur aanhoudt, hoe groot is dan de afstand die de lucht heeft afgelegd?
   b. Als die lucht bij ons aankomt, vanwaar kan hij dan afkomstig zijn?

4. Een verkeersvliegtuig (Boeing 747) vliegt met een gemiddelde snelheid van 950 km/uur van New York naar Amsterdam (5400 km).
   a. Hoe lang duurt de vlucht?
   b. Hou je aan deze vlucht een jet-lag over?

5. Van een bepaalde beweging is het *s-t* diagram hieronder gegeven.
   a. Beschrijf in je eigen woorden wat voor een beweging dit moet zijn geweest.
   b. Bereken de snelheid bij elk van de drie delen van de beweging.
   c. Teken het *v-t* diagram dat bij deze beweging hoort.



2.2 De rondgaande beweging

Na de hiervoor beschreven introductie van de rechtlijnige beweging zullen we nu voorbeelden van rondgaande bewegingen bespreken aan de hand van enkele technische toepassingen.

Draaischijf

In een speeltuin staat een schijf (d=3m) die rond kan draaien en waarop je kunt gaan staan. Als de schijf in 5 sec ronddraait, is de omtreksnelheid:

$$v = \frac{s}{t} = \frac{\pi d}{t} = \frac{3{,}14 \times 3}{5} \simeq 1{,}88 \text{ m/s. Dit is } 1{,}88 \times 3{,}6 = 6{,}8 \text{ km/h.}$$

Vervolgens kunnen de leerlingen berekenen wat de snelheid op ½ m en op 1 m van het middelpunt is. Idem wanneer de schijf in 3 sec of in 1 sec ronddraait. De omtreksnelheid is evenredig met de afstand tot het middelpunt.

Twee wielen op één as hebben altijd een gelijk toerental; hun omtreksnelheden zijn recht evenredig met hun diameters.

Tandwiel-, snaar- of kettingoverbrenging

Twee wielen verbonden door een ketting, een riem of door tanden hebben dezelfde omtreksnelheid. Omdat de tanden allemaal even groot zijn, is de verhouding van het aantal tanden gelijk aan de verhouding van de diameters. De toerentallen van de wielen verhouden zich omgekeerd evenredig met de aantallen tanden.

Voorbeeld:
Gegeven twee tandwielen met resp. $z_1 = 52$ tanden en $z_2 = 16$ tanden.
Diameter $d_1 = 25$ cm, toerental $n_1 = 1{,}5$ omw/s.
Gevraagd: d_2 en n_2.

$$\frac{d_1}{d_2} = \frac{z_1}{z_2} = \frac{52}{16} = 3{,}25 \rightarrow d_2 = \frac{d_1}{3{,}25} = \frac{25}{3{,}25} = 7{,}7 \text{ cm}$$

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{z_1}{z_2} = 3{,}25 \rightarrow n_2 = n_1 \times 3{,}25 = 1{,}5 \times 3{,}25 = 4{,}9 \text{ omw/s.}$$

Tandwielen met rechte tanden raken elkaar op een punt, het contactpunt. Schuine tanden hebben een glijlijn als contactverloop, waardoor veel minder slijtage optreedt.

De behandeling van differentieel, versnellingsbak of worm-wormwieltakel zijn ook uitstekende voorbeelden voor de 10e klas, evenals de lagering van assen met glijkogels of druklagers. Het zoeken naar overbrengingen sluit altijd goed aan en kan meerdere dagen voortgezet worden.

Opgaven

Hieronder volgen enige vraagstukken die op elkaar aansluiten en waarbij men de fiets met al zijn draaiende delen nader leert kennen. Men maakt de overgang van naïeve gebruiker naar actief kennende gebruiker en objectieve berekenaar.

1. Een fietser wil graag iets te weten komen over de overbrengverhouding op zijn fiets. Daarom gaat hij een beetje zitten tellen en rekenen tijdens het fietsen. Eerst meet hij hoeveel seconden het duurt om de afstand tussen twee hectometerpaaltjes af te leggen. Dat duurt 20 s.
   a. Ga na dat zijn snelheid 18 km/uur is.

   Hij telt nu hoeveel keer zijn trappers rond moeten in één minuut. Dat is 55 keer helemaal rond. De lengte van de trapperstang is 17,5 cm.
   b. Hoe groot is de snelheid van de trappers in hun rondgaande beweging?

2. De fietser rijdt op 28 inch banden. Dat wil zeggen dat de wieldiameter inclusief band 28 inch is (1 inch = 2,54 cm).
   a. Hoe groot is de omtrek van een wiel?
   b. Hoeveel keer draait dat wiel rond op een afgelegde weg van 100 m?

   Zijn fiets heeft geen versnelling.
   c. Ga na dat de overbrengverhouding trappers achterwiel ongeveer 2:5 is.

3. Later thuis gekomen wil hij dit gaan controleren door de tanden van de tandwielen te tellen. Hij vindt: voortandwiel 44 tanden, diameter 17 cm, achtertandwiel 18 tanden, diameter 7 cm.
   a. Laat zien dat deze getallen juist kunnen zijn.
   b. Hoe groot is de overbrengverhouding van de trappers naar het achterwiel, berekend uit deze getallen? Klopt dit met de eerder gevonden verhouding?

4. De diameter van zijn dynamowieltje is 18 mm.
   a. Hoeveel omwentelingen per seconde maakt dat wieltje bij gemiddelde snelheid?
   b. Hoe groot is de overbrengverhouding voorwiel-dynamowieltje?

2.3 De ritmische beweging

Een toegankelijk en mooi voorbeeld hiervan vormt de slinger. Allereerst laat men verscheidene voorwerpen slingeren. Dan vraagt men de leerlingen waar de slingertijd (de tijd die nodig is om één keer heen en weer te slingeren) vanaf hangt. Genoemd worden bijvoorbeeld: gewicht, uitwijking, slingerlengte, wrijving. Vervolgens kan de invloed van elk der factoren één voor één worden onderzocht.

Meet men bijvoorbeeld de tijd van tien slingeringen bij verschillende beginuitwijkingen, dan blijkt deze min of meer gelijk te zijn. Bij grote beginuitwijkingen wordt de slingertijd iets langer. De invloed van de wrijving kan men onderzoeken door een stuk papier op het slingergewicht te bevestigen. De slingeruitwijking neemt nu snel af, maar de slingertijd blijft toch gelijk. Dan kan men de slingertijd voor verschillende gewichten meten. Deze blijkt ook gelijk te zijn. Een proef die op een volgend spoor brengt is de volgende. Wanneer de slinger heen en weer gaat, verkort men de slingerlengte door het touw van de slinger over een scharnierpunt te trekken. De slinger zal nu sneller gaan en de uitwijking zal toenemen. De systematische meting van het verband tussen slingerlengte en slingertijd kan men de leerlingen thuis laten uitvoeren. De volgende dag verzamelt men de metingen:

lengte (m)	*tijd* (s)
1	2
2	2,8
½	1,4
¼	1

Tussen de meetgegevens constateert men de volgende relaties:
- wordt de slingerlengte 4 keer kleiner, dan wordt de slingertijd 2 keer kleiner;
- wordt de slingerlengte 2 keer kleiner, dan wordt de slingertijd $\sqrt{2}$ keer kleiner.

De begripsopbouw kan als volgt geschieden:
1. Langere slingerlengte, dan ook langere slingertijd.
2. Een vier keer langere lengte geeft een twee keer langere tijd.
3. Neemt de lengte kwadratisch toe, dan neemt de tijd met de eerste macht toe.
4. De verhouding tussen de slingertijden T komt overeen met de wortel uit de verhouding van de slingerlengten l. In formule:

$$\frac{T_1}{T_2} = \sqrt{\frac{l_1}{l_2}}$$

5. De lengteverhouding komt overeen met het kwadraat van de tijdsverhouding:

$$\frac{l_1}{l_2} = \frac{T_1^2}{T_2^2} \quad \text{of} \quad \frac{T^2}{l} = \text{constant}$$

6. In de formules van stap 4 en 5 kunnen we nu de gegevens van een referentieslinger invullen, bijvoorbeeld: $l_2 = 1$ m en $T_2 = 2$ s. Hieruit volgt het algemene verband:

$$T = 2\sqrt{l} \quad \text{of} \quad l = \frac{1}{4}T^2$$

Zo kan men voor iedere slinger de waarde van T of l berekenen, wanneer de andere bekend is. De relatie $l \propto T^2$ kan men nu als uitgangspunt nemen voor het maken van een aantal opgaven, zodat het rekenen met kwadratische verhoudingen geoefend kan worden. Daarmee legt men een basis voor de latere bespreking van de vrije val en de eenparig versnelde beweging.

Opgaven

1. Een kroonluchter in een kathedraal slingert heen en weer. Hij maakt 6 hele slingeringen in 1 minuut.
   Schat de lengte van de kabel waaraan hij hangt.

2. Een slinger van 1,2 m en een van 1,0 m worden in hun uiterste stand tegelijk losgelaten.
   Bereken hun slingertijden. Hoe lang duurt het voordat ze weer gelijktijdig hun uiterste stand bereiken?

2.4 Combinaties van bewegingen, samengestelde beweging

Na de behandeling van de rechtlijnige, rondgaande en ritmische beweging kan men de leerlingen naar combinaties van deze grondtypen laten zoeken. We zetten een aantal voorbeelden in schema:

	rond	ritmisch	recht
rond	tandwielen ketting/riemover- brenging dynamo op fiets- band	naaimachine excentriek klepstoker zaagmachine	lier fiets schroef krik vishengel
ritmisch	zuiger/krukas onrust van klok	schommelen adem/hersen- vocht	vliegende hollander zwemmen zagen
recht	windmolen waterrad	wind/vlag wier in stro- mend water	heimachine/paal zeilboot

Deze voorbeelden hebben betrekking op allerlei situaties waarin de ene beweging een andere teweegbrengt. Men kan de leerlingen naar nog andere vormen van overbrenging vragen of bijvoorbeeld de volgende opgave geven.

Beschrijf de samenhang van de bewegingen in de volgende situaties:

a. Wind waait over een korenveld en doet de halmen bewegen.
b. Stromend water in een rivier doet een gierpont van de ene oever naar de andere gaan.
c. Je blaast over de hals van een (lege) fles en je hoort een toon klinken.
d. Je rijdt op je fiets en je voorwiel beweegt.
e. Je rijdt op je fiets en je achterwiel beweegt.
f. Je rijdt op je fiets over een klinkerweg en je wat loszittende achterspatbord beweegt.
g. Je schrijft op het bord en het krijtje piept.

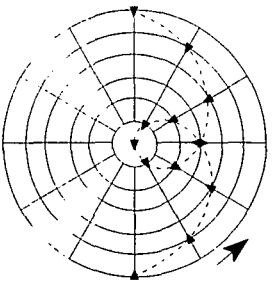
Daarnaast zijn er ook situaties waarin een beweging als een samenstelling van de basisbewegingen is te beschouwen. Enkele voorbeelden daarvan hieronder.

Lopen over een draaischijf

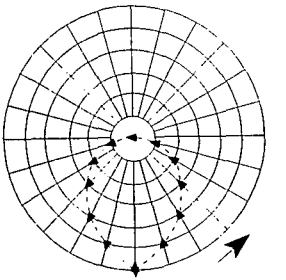
Welke beweging neem je van bovenaf waar als iemand dwars over een draaiende schijf loopt, die intussen precies één keer ronddraait? En welke als de schijf intussen een half rondje draait? We verdelen de middellijn (het looptraject) in 12 gelijke stukken. Draait de schijf één keer rond, dan

verdelen we de cirkel ook in 12 segmenten. Draait de schijf een half rondje, dan verdelen we de cirkel in 24 segmenten. Toelichting bij het construeren:

- Loop je neus achterna door telkens naar de volgende concentrische cirkel te stappen.
- Intussen draait de schijf, dus beweegt naar een volgend cirkelsegment.
- De bewegingen worden op deze wijze samengesteld.



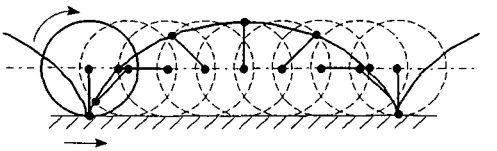
De schijf draait één rondje



De schijf draait een half rondje

Het rollende wiel: cycloïde

Het wiel van een fiets of ander voertuig heeft twee bewegingen, namelijk een rondgaande en een rechtgaande. Loopt men naast een fiets, dan valt op dat het ventiel achterblijft wanneer het dicht bij de grond is en vooruit snelt wanneer het boven is. Op de grond staat het stil, omdat het wiel ten opzichte van de stilstaande grond niet slipt. Het hoogste punt van het wiel heeft een dubbele snelheid. Men kan dit door de volgende constructie verduidelijken:



Bovenaan werken de rondgaande en de voortgaande bewegingen in dezelfde richting. Onderaan werken de rondgaande en de voortgaande bewegingen elkaar tegen. Omdat de snelheid in het laagste punt nul is, hebben beide bewegingen een even grote snelheid en is de snelheid van het hoogste punt het dubbele van die van de as.

Als variant kan men de beweging van een rupsband onderzoeken die het stilstaan op de grond duidelijk laat zien.

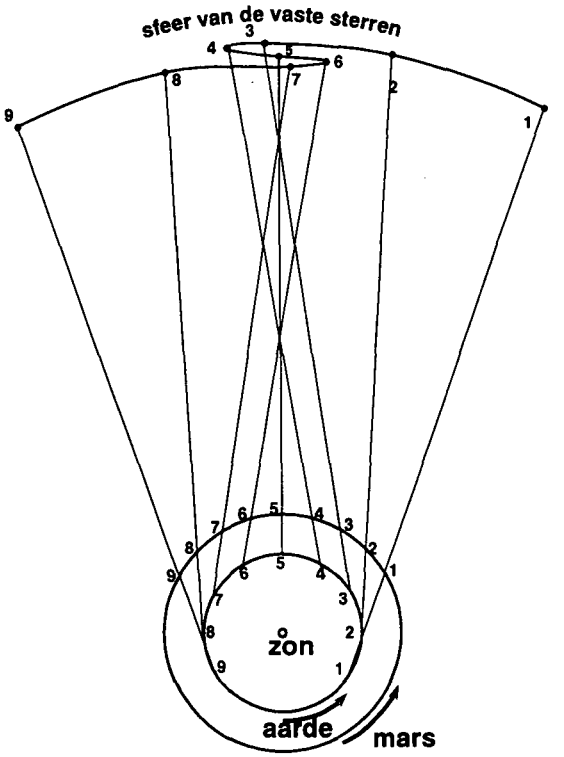
De planeetbanen

Hierbij hebben we te maken met een combinatie van rondgaande bewegingen. Als voorbeeld bekijken we de beweging van de planeet Jupiter. In eerste instantie beweegt Jupiter, samen met alle sterren en planeten, dagelijks in een cirkel rondom de aarde, de spiegeling van de aswenteling van de aarde. Zien we af van deze dagelijkse beweging, dan beschrijft Jupiter, vanuit de aarde gezien, een baan langs de sterrenhemel in ongeveer 12 jaar, die echter niet regelmatig verloopt. Soms ziet men Jupiter ten opzichte van de vaste sterren vooruit snellen, soms teruglopen. Ptolemeus (87-150) volgde de traditie van Aristoteles (384 - 322 v.C.), die stelde dat de planetensferen tot het goddelijke domein behoorden en dus de meest volmaakte geometrische vorm hadden, de cirkel. Ptolemeus verklaarde de heen- en teruggaande beweging van Jupiter ten opzichte van de vaste sterren door de aanname dat de planeet tegelijkertijd aan twee cirkelbewegingen deelneemt: een (kleine) cirkel, de epicykel, die de planeet in een jaar doorloopt en waarvan het middelpunt in twaalf jaar een grote cirkelbaan om de aarde beschrijft.

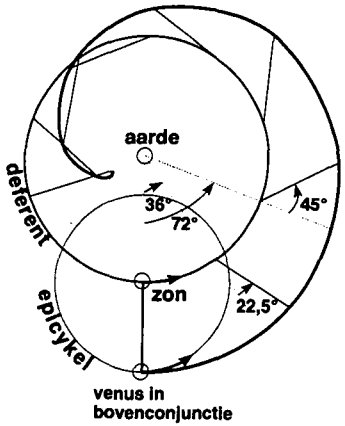
Vanaf het moment dat Copernicus (1473-1543) het heliocentrische wereldbeeld concipieerde kwam de weg vrij om de heen- en weergaande beweging van Jupiter te verklaren vanuit de combinatie van een (nagenoeg) cirkelvormige beweging van Jupiter om de zon in twaalf jaar en de beweging van de aarde, die zelf in één jaar een (nagenoeg) cirkelvormige baan rond de zon beschrijft. Door de beweging van de aarde ziet men Jupiter heen en weer bewegen ten opzichte van de sterrenhemel, net zoals men een raamkozijn op en neer ziet bewegen ten opzichte van het panorama buiten het raam wanneer men zijn hoofd op en neer beweegt.

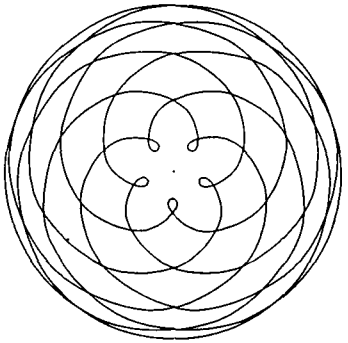
Uit de gegevens van afstanden en tijden kunnen we de planeetbanen construeren. Hieronder volgen die constructies voor Mars en Venus, ieder op een bepaalde manier beschouwd.

a. *Mars* is evenals Jupiter een buitenplaneet: zijn baan om de zon ligt buiten die van de aarde en volgt hetzelfde principe als die van Jupiter, alleen zijn de verhoudingen heel anders. Mars bevindt zich gemiddeld op 1,52 AE van de zon (AE = Astronomische Eenheid = gemiddelde afstand van aarde tot zon) en doorloopt zijn baan in circa 2 jaar. Tekenen we de baan van de aarde als een cirkel met straal van 2 cm, dan moet de baan van Mars getekend worden als een cirkel met een straal van ruim 3 cm. Nemen we als tijdsstap 1 maand, dan moeten we de baan van de aarde in 12 delen verdelen en die van Mars in 24 delen. We tekenen aarde en Mars in 9 posities, waarvan de 5e in oppositie. Vanuit de aarde tekenen we de kijkrichtingen naar de sfeer van de vaste sterren. Deze kijkrichtingen vertonen ten opzichte van deze sfeer een heen en weer gaande beweging.



b. *Venus* is een binnenplaneet: haar baan ligt tussen die van de aarde en de zon. Venus is circa 0,7 AE van de zon verwijderd We beschouwen de baan van Venus geocentrisch, in bovenaanzicht, dus zo dat de aarde in het middelpunt staat en we de zon er in een cirkel omheen zien bewegen. De omlooptijd van Venus is zo dat ze vrijwel precies 5 omlopen maakt in 8 aardejaren. De baan van Venus wordt beschreven door een punt op een epicykel. Als het middelpunt van de epicykel 36° verder op de deferent is, dan moet de epicykel 5/8 x 36 = 22,5° extra verder gedraaid zijn. Verder moet gelden: $r_{def} : r_{epi} = 10 : 7$. In de tekening is begonnen bij een bovenconjunctie. Na 8 stappen wijst de straal van de epicykel die de plaats van Venus aanwijst naar het middelpunt, naar de aarde. Venus is dan in benedenconjunctie. Het volgende deel van de baan is het spiegelbeeld van het eerste getekende stuk. Gebruiken we de tekening van het eerste deel als mal dan kunnen we snel de volledige baan tekenen.





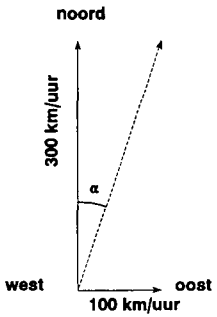
Een schip in dwarsstroom of een vliegtuig in zijwind

Eenvoudig maar in de praktijk veel voorkomend is de samenstelling van twee rechtlijnige bewegingen. Een vliegtuig dat vliegt door een windveld neemt deel aan twee voortgaande bewegingen. Het gaat ten opzichte van de lucht vooruit en wordt ten opzichte van de grond ook nog meegenomen door de wind. Een voorbeeld.

Een vliegtuig vliegt volgens kompas in noordelijke richting met een snelheid van 300 km/uur, er is een westenwind van 100 km/uur. Teken de richting waarin het vliegtuig ten opzichte van de grond zich verplaatst. Hoe groot is de snelheid die het vliegtuig heeft ten opzichte van de grond?

$$v = \sqrt{300^2+100^2} = 100\sqrt{10} \approx 316 \text{ km/h}$$

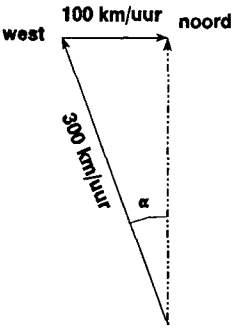
$$\tan \alpha = 1/3 \rightarrow \alpha \approx 18° \text{ oost}$$



De piloot wil nu zo sturen dat hij ten opzichte van de grond een noordelijke koers volgt. Hoe moet hij sturen en hoe groot wordt dan zijn snelheid ten opzichte van de grond?

$$v = \sqrt{300^2 - 100^2} = 100\sqrt{8} \approx 283 \text{ km/h}$$

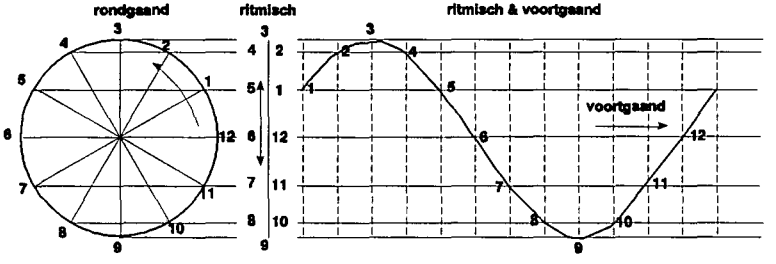
$$\sin \alpha = 1/3 \rightarrow \alpha \approx 19° \text{ west}$$



De sinusoïde

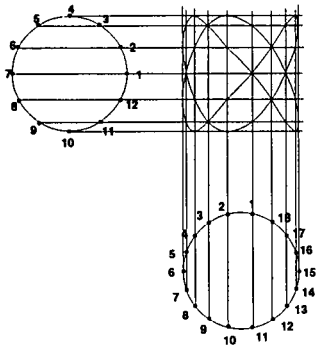
Een andere in de praktijk ook zeer interessante samengestelde beweging is de beweging die ontstaat als een ritmische (harmonische) beweging samengesteld wordt met een rechtlijnige. Zoiets kan je experimenteel zichtbaar maken met behulp van een stemvork met een haakje aan één van de poten. Deze stemvork moet een lage frequentie hebben bijv. 125 Hz. Als je hem aanslaat dan kan je hem langs een beroet glasplaatje (10 × 20 cm) halen. Een andere mogelijkheid is om een fles gevuld met gezeefd zand te laten slingeren. Terwijl het zand uit de fles loopt trek je er dan regelmatig een strook zwart papier (30 × 200 cm) onderdoor. Mooi wit zand krijg je door het zand dat verkocht wordt voor vogelkooien te zeven.

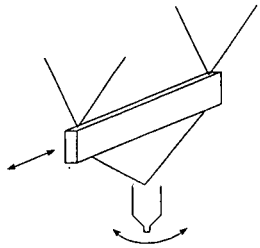
De constructie van zo'n spoor kan gemaakt worden door te bedenken dat een harmonische beweging een cirkelbeweging is "van opzij gezien", een geprojecteerde cirkelbeweging dus. Verdeel een cirkelomtrek in 12 gelijke delen; de deelpunten zijn de plaatsen waar een ronddraaiend punt zich op achtereenvolgende tijdstippen bevindt. Deze punten worden geprojecteerd. Je ziet dan het spoor van een ritmische beweging. Als je deze nu combineert met een rechtlijnige beweging dan ontstaat het spoor van de samengestelde beweging zoals deze in de proefjes werd getoond. Het spoor is in de wiskunde bekend als de sinuslijn.



Figuren van Lissajous

Een logisch vervolg hierop is het samenstellen van twee loodrecht op elkaar staande ritmische bewegingen. Beide worden weer vanuit een cirkelbeweging geconstrueerd. De figuur die ontstaat als het spoor van de beweging wordt genoemd naar Lissajous. De leerlingen kan men bladen uitdelen waarop al enig voorwerk is gedaan zoals hieronder. De beide cirkels zijn even groot, ze worden in dezelfde richting doorlopen, met hetzelfde beginpunt, maar niet met dezelfde omloopsnelheid. Hier is de verhouding 2:3, dat geeft een niet àl te ingewikkeld patroon. Het spoor kan experimenteel verkregen worden door de zandfles te laten slingeren aan een samengestelde slinger.





Met een samengestelde slinger kunnen we heel fraaie figuren maken. Een relatief zware balk hangt aan vier touwen aan een plafond. De touwen moeten alle even lang zijn en netjes in een rechthoek aan het plafond zijn vastgemaakt. De balk kan dan alleen in zijn lengterichting slingeren. Onder de balk hangt dan de tweede slinger: een fles met zand. Deze hangt aan twee even lange touwen zodat hij alleen dwars op de lengterichting van de balk kan slingeren. Als nu de balk én de fles beide slingeren, dan voert de fles een samengestelde slingerbeweging uit. Deze beweging kan je dan registreren door uit de fles zand te laten lopen. Gebruik hiervoor (gezeefd) vogelkooizand. Als je dat op een strakgespannen zwarte doek laat vallen, dan geeft dat een mooi contrast en het is ook gemakkelijk opgeruimd. De fles moet veel meer zand bevatten dan je eruit wilt laten stromen, want als hij vrijwel leeg is dan slingert hij door de relatief groter wordende luchtwrijving niet zo goed meer. De balk moet betrekkelijk zwaar zijn, want als de fles een beetje leegstroomt dan gaat het gemeenschappelijke zwaartepunt van balk en fles wat omhoog en daarmee verandert de periode van de bovenste slinger.

Het is het mooist als de twee slingers zo afgesteld zijn (door de lengte van de koorden aan te passen) dat hun perioden zich tot elkaar verhouden als eenvoudige getallen (b.v. 3:5). Daarbij moet je wel bedenken dat de bovenste slinger bestaat uit de balk en de fles samen. Uitproberen is het gemakkelijkst, want de fles moet ook nog vlàk boven de doek hangen.

2.5 De golfbeweging

Dit onderwerp sluit aan bij de ritmische beweging. Eerst kunnen een aantal voorbeelden van trillingsbewegingen worden getoond die goed waarneembaar zijn. De behandeling van de drukgolven bij geluid betekent een stap naar de abstractie en kan daarom beter in tweede instantie volgen.

Lopende golven in touw of veer

Met een touw, maar nog beter met een lange veer, kan men de langs- en dwarsgolven laten zien. Men heeft hier te maken met een nabootsingsprincipe: wat vooraan of elders wordt aangezet, wordt nagedaan door de rest van de veer. Vervolgens kan men de weerkaatsing van een dwarsgolf aan een los of vast uiteinde onderzoeken.

Terugkaatsing van lopende golven

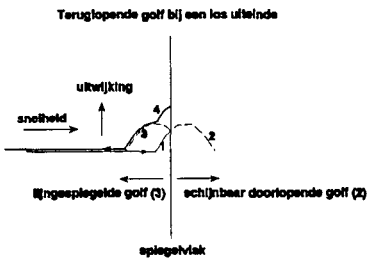
a. *Bij een los uiteinde.* Hiervoor bindt men een dun draadje aan het uiteinde van de veer. We zien een golfberg terugkeren als een golfberg. Hetzelfde geldt voor een golfdal. We kunnen stellen dat een vrij uiteinde geheel meedoet aan het nabootsingsprincipe.

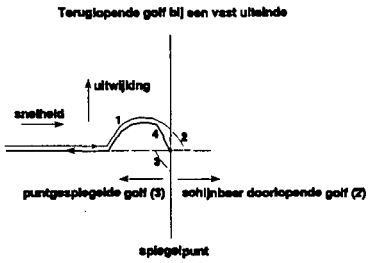
Terugkerende golven kunnen geconstrueerd worden door gebruik te maken van lijnspiegeling: door de lopende en de gespiegelde golf bij elkaar op te tellen krijgt men de reële uitwijking van de veer.

Nu kunnen een aantal begrippen opgehaald worden: de lengte van een golfberg en -dal noemen we de golflengte λ, de trillingstijd T, het aantal trillingen per seconde de frequentie f, de voortplantingssnelheid van de golf v. De relatie hiertussen is:

$$v = \frac{s}{T} = \frac{\lambda}{1/f} = \lambda f$$

b. *Bij een vast uiteinde.* Hierbij keert een golfberg als een dal terug en vice versa. Het vaste uiteinde weerstaat de beweging en brengt een tegenbeweging teweeg. Het samengaan van de lopende en teruggekaatste golf kan men construeren door gebruik te maken van puntsymmetrie: ook hier ontstaat de reële uitwijking van de veer door de lopende en de gespiegelde golf bij elkaar op te tellen.





Watergolven

Door proeven met de golfbak zijn o.a. cirkelgolven, evenwijdige golven, weerkaatsing tegen een wand, golflengteverkleining in ondieper water (zoals boven een zandbank kleine golfjes ontstaan) zichtbaar te maken. Bij het overgaan van de watergolfjes naar een ondieper gedeelte kan men wijzen op het "breken" naar de normaal toe. Hetzelfde is aan de kust te zien: de brekergolven komen steeds loodrecht op het strand af.

Staande golven

Neem een soepele veer, zet één uiteinde vast en breng het andere uiteinde in een op- en neergaande beweging, terwijl de veer onder een constante spanning gehouden wordt. Bij een bepaalde frequentie treedt een mooi patroon op, waarbij sommige punten van de veer stil staan. Dit patroon ontstaat doordat heengaande en terugkerende golven elkaar ondersteunen. Dit is alleen het geval als de golfbeweging precies in de lengte past. Voert men de frequentie van de op- en neergaande beweging langzaam op, dan ontstaat eerst chaos en daarna weer regelmaat met een vast punt extra. Hieraan kan aanschouwelijk gemaakt worden dat een regelmatig patroon alleen ontstaat, wanneer de lengte van de veer overeenkomt met een geheel aantal keren een golfberg, ofwel $n \times \frac{1}{2} \lambda$.

Ook is het mogelijk twee touwen diagonaal in het lokaal te spannen, de een dik de ander dun. Neem in elk der touwen een krachtmeter op en zet de beide touwen onder dezelfde spanning. Tik op beide touwen tegelijk en je kan zien dat in het dunne touw de golfsnelheid het grootst is. Span nu twee even dikke touwen met verschillende spanning en doe hetzelfde. Nu is de snelheid in het strakste touw het grootst. Met $v = \lambda f$ kan je nu snel duidelijk maken waarom de snaren in een vleugel dik/dun, kort/lang of strak/minder strak zijn.

Na bestudering van golfbewegingen in veren en vloeistof kan men overgaan op proeven met geluid. Men kan die introduceren met stemvorken, waarbij (net als bij alle slag-, blaas- en snaarinstrumenten) kleine afmetingen hoge tonen en grote afmetingen lage tonen voortbrengen.

Resonantie

a. Houd een stemvork boven een glazen buis. Door de buis in een bak met water te houden kan men de lengte van de luchtkolom variabel maken. Neemt men een stemvork van 512 Hz, dan treedt resonantie op wanneer de buis circa 14, 46, 78 en 110 cm uit het water steekt. Het verschil tussen de resonantieafstanden heeft een constante waarde:

14 (+32) 46 (+32) 78 (+32) . 110

Deze waarde is bij alle stemvorken steeds het dubbele van de kleinste resonantieafstand; bij 512 Hz is die 16 cm. Doordat de buik van de luchttrilling iets boven het uiteinde van de buis ligt, is de buislengte boven water iets kleiner dan 16 cm. Het wateroppervlak fungeert hier als een vast uiteinde dat stilstaat, dus geen drukvariaties ondergaat. De open bovenkant van de buis is als een los uiteinde dat wel drukvariaties ondergaat en waar de stemvork de beweging in stand houdt. Net als bij de staande dwarsgolf past het golfpatroon alleen in de buis bij bepaalde lengtes. Dit treedt voor de eerste keer op wanneer de lengte van de luchtkolom ¼ λ is en vervolgens bij ¾ λ, 1¼ λ, 1¾ λ, enz. De drukvariaties in de lucht verplaatsen zich dus met een snelheid die berekend kan worden uit:

$$s = 16 \text{ cm} = 0{,}16 \text{ m}$$

$$t = \frac{1}{4} \cdot \frac{1}{f} = \frac{1}{4} \cdot \frac{1}{512} = \frac{1}{2048} \text{ s}$$

$$v = \frac{s}{t} = 0{,}16 \times 2048 = 328 \text{ m/s}$$

b. Proef van Kundt. Gebruikt wordt een buis met kurkvijlsel en een hoge druk luidspreker, aangesloten op een frequentiegenerator. De resonantie is hoorbaar en zichtbaar. Door de buislengte te variëren kan men onderzoeken welke frequenties passen. Resonantie treedt weer op wanneer de halve golflengte een geheel aantal keren in de buis past. Aansluitend kan men de proeven van Quincke en Melde doen.

c. Twee hoge druk luidsprekers naast elkaar in de buitenlucht opgesteld (binnen ontstaan er teveel reflecties op de wanden) geven een hyperbolische verdeling van sterke en zwakke geluidssterkten. Vraag de leerlingen op 5 à 10 meter afstand van de luidsprekers in de dwarsrichting met een luisterend oor heen en weer te lopen tot waar ze zo min mogelijk geluid waarnemen.

De begrippen resonantie en eigenfrequentie kunnen nog nader aanschouwelijk gemaakt worden aan twee identieke stemvorken, een trillend spatbord, de beroemde Tacoma Narrows Bridge in de USA, een plank over een sloot, een ladder opklimmen terwijl de stapsnelheid met de eigenfrequentie overeenkomt, water in een bad in ritmische beweging brengen.

Resonantie is een verschijnsel dat zich ook zeer goed laat vergelijken met de menselijke ziel. Als iemand een enthousiast verhaal hoort vertellen over een landstreek, waar degene zelf ook pas een leuke vakantie heeft genoten, dan kan de ziel gaan meebewegen, gaan 'resoneren'. Als 'je eigen toon' op die manier wordt aangeslagen, kan je beleving extra versterkt worden.

2.6 De valbeweging

Aan dit thema is het opnieuw mogelijk de methode van onderzoek die bij de eenparige rechtlijnige beweging werd gevolgd te gebruiken (zie paragraaf 2.1). Men begint met gekleurde ballen die in mooie bogen geworpen worden. Men vraagt: welke bal vind jij het mooiste en welke boog spreekt je het meeste aan? Dan laat men verschillend gekleurde blaadjes vallen, zowel in verticale als in horizontale stand. Herinner ook aan de eigen valbeweging, bijvoorbeeld als een auto hard over de top van een heuvel rijdt en vraag naar de beleving daarbij. Steeds vraagt men wat wel en niet bevalt. Zo blijft men in het gebied van de sympathie en antipathie.

Een hele andere invalshoek vormt de vraag naar de samenhang van al deze bewegingen. Nu moet er weer worden waargenomen, niet om de proef te beleven, maar om je er denkend mee te kunnen verbinden. Men zal onbelangrijke factoren moeten uitsluiten om het vallen zo puur mogelijk tevoorschijn te laten komen: een proces van elimineren, van uitsparen, opdat het fenomeen vallen zich uit kan spreken. Vragen als: hoe variëren we een proefopstelling? welke proef gaat aan deze vooraf en welke sluit er bij aan? moeten gesteld worden, opdat het "vallen" in doorzichtige klaarheid als noodzakelijk gevolg van de proefopstelling denkend-waarnemend zichtbaar wordt. Een mogelijke ervaringsreeks krijgt men door achtereenvolgens de volgende voorwerpen te laten vallen en te kijken wat gebeurt: een stuk papier, gum, krijtje, blokje hout, balletjes van verschillend formaat, ballon met waterstofgas, dot watten, dot watten in een schaaltje, enz.

De ballon gaat omhoog, net als een blokje hout onder water. Gewichtsvermindering treedt bij alle voorwerpen in lucht op, maar is meestal procentueel klein, namelijk minder dan 2%. Een andere factor is dat de luchtverplaatsing bij het vallen remmend werkt op de val. Hierdoor krijgen grote, lichte dingen, zoals een dot watten, al snel een constante snelheid. Dit

kan ook goed zichtbaar gemaakt worden door een knikker in een buis met water te laten vallen. Wil men de val als fenomeen op zichzelf onderzoeken, dan moet men compacte, zware voorwerpen nemen, zoals een steen, een stalen kogel, enz. De samenhang tussen de factoren gewichtsvermindering, wrijving en vallen is zodanig, dat alle voorwerpen in het begin steeds sneller vallen, vervolgens met een constante snelheid vallen totdat ze op de grond te belanden. Alleen duurt bij grote, lichte materialen de versnellende fase korter dan bij compacte, zware voorwerpen. De volgende proevenreeks biedt aanknopingspunten voor een voortzetting van de begripsvorming.

1. Laat verschillende compacte voorwerpen vallen van enige meters hoogte. Alle voorwerpen beschrijven dezelfde valbeweging. Het optillen en omhoog brengen van de voorwerpen is gewichtsafhankelijk, evenals het effect bij het neerkomen. Maar de valbeweging zelf is onafhankelijk van het gewicht. Dit wordt helemaal goed zichtbaar door verschillende voorwerpen (stukje lood, lucifer en papiertje) in een vacuüm gezogen valbuis te laten vallen; het vallende voorwerp is dan optimaal van de omgeving geïsoleerd.

2. De proef met het knopentouw van August laat zien dat bij grotere valhoogtes de eindsnelheid toeneemt. Dit betekent ook dat tijdens de val in dezelfde tijden steeds grotere afstanden worden afgelegd. Men kan dit heel mooi hoorbaar maken. Wanneer men de knoopafstanden in de verhoudingen 1 : 3 : 5 : 7 enz. neemt, dan hoort men tijdens het vallen de knopen met een regelmatige tik op de grond vallen. Een touw van circa 10 m lengte met een tiental zware moeren in plaats van knopen maakt dit nog scherper hoorbaar. Aangezien tijdens het vallen de tijdsverschillen constant zijn geeft de reeks 1 : 3 : 5 : 7 enz. de snelheidstoename weer. Hieruit volgt dat de snelheidstoename per tijdsverschil constant is, dus dat bij een valbeweging de snelheid evenredig met de tijd toeneemt.
   Men kan de leerlingen erop wijzen dat de valhoogten kwadratisch oplopen, volgens een rekenkundige reeks van de tweede orde, namelijk $h_1 = 1$ $h_2 = 1+3 = 4$ $h_3 = 1+3+5 = 9$ $h_4 = 1+3+5+7 = 16$ enz.

3. De kogelglijbaan volgens Galileï. Men laat een stalen kogel rollen van een schuin opgesteld aluminium hoekprofiel, waarop lengtematen zijn aangebracht. Laat een aantal leerlingen met stopwatches de tijd meten en neem daarvan het gemiddelde. Meet de tijden eerst om de halve meter:

s(cm)	t(s)
0	0
50	1,55
100	2,2
150	2,7
200	3,1

Hieruit is af te lezen dat bij een verdubbeling van de tijd de afstand verviervoudigt.

Meet vervolgens de tijden bij afstanden die kwadratisch toenemen:

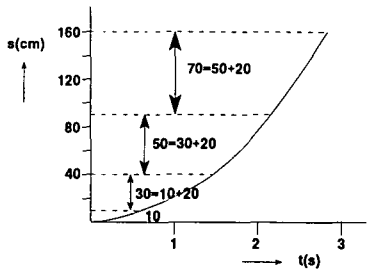
s(cm)	s(dm)	t(s)
0	0	0
10	1	0,7
40	4	1,4
90	9	2,1
160	16	2,8

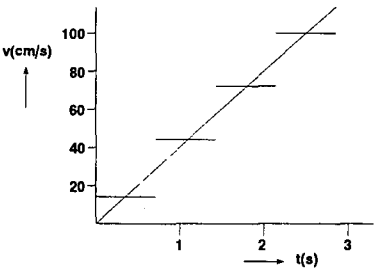
In dit geval nemen de tijden toe volgens een rekenkundige reeks.

Met deze tweede tabel kan als volgt gerekend worden:

s (cm)	Δs (cm)	t (s)	Δt (s)	$v = \frac{\Delta s}{\Delta t}$ (cm/s)	Δv (cm/s)	$a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$ (cm/s/s)
0		0				
	10		0,7	$\frac{10}{0,7} = 14,3$		
10		0,7			28,5	$\frac{28,5}{0,7} = 40,7$
	30		0,7	$\frac{30}{0,7} = 42,8$		
40		1,4			28,6	$\frac{28,6}{0,7} = 40,9$
	50		0,7	$\frac{50}{0,7} = 71,4$		
90		2,1			28,6	$\frac{28,6}{0,7} = 40,9$
	70		0,7	$\frac{70}{0,7} = 100$		
160		2,8				

De s,t en v,t grafieken zijn als volgt opgebouwd (op elk tijdstip is $v_t = 2 \times v_{gem}$):





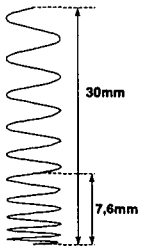
De volgende tussenstand is gelijk aan de vorige plus 20. Het getal 20 staat voor de constante toename van de tussenstanden.

De snelheidstoename is constant, in dit geval 28,6 cm/s.

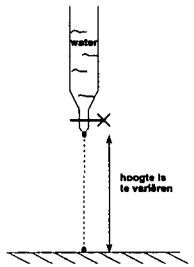
4. De tijdtikker. Deze proef is algemeen bekend. De gemeten waarden wijken soms beduidend af van de gravitatieversnelling, maar door de grootste gemeten afstandsverschillen te gebruiken krijgt men acceptabele uitkomsten. De eerste puntjes zijn vaak onduidelijk. Neem een aantal puntjes na elkaar en bereken de versnelling van de vrije val met behulp van de volgende tabel:

Δs (cm)	Δt (s)	v_{gem} (cm/s)	Δv (cm/s)	$a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$ (cm/s/s)
1,8	1/50	90		$\frac{20}{1/50} = 1000$
			20	
2,2	1/50	110		
			20	
2,6	1/50	130		
			20	
3,0	1/50	150		
			20	
3,4	1/50	170		

5. De proef van Lippich: een beroete vallende glasplaat langs een trillende stemvork. Met een stemvork van 128 Hz hebben de eerste 5 golfjes een lengte van 7,6 mm. De eerste 10 golfjes zijn samen 3 cm lang. Men ziet hieruit dat de proef vrij nauwkeurig uitgevoerd moet worden. Neemt men net als bij de tijdtikker de latere golfjes die vrij goed te zien zijn, dan kan men op vergelijkbare wijze als proef 4 tot een acceptabel resultaat komen.



6. De druppelproef. Het kraantje van een met water gevulde buret wordt zo afgesteld, dat de volgende druppel loslaat, als de voorgaande op de ondergrond valt. De hoogte wordt gevarieerd. Meet de tijd voor 10 á 20 druppels:



h (m)	t(20 dr.) (s)	t(1 dr.) (s)	$v_{gem}=h/t$ (m/s)	$v_{eind}=2v_{gem}$ (m/s)
0,25	4,5	0,225	1,11	2,22
0,5	6,4	0,32	1,56	3,13
0,75	7,8	0,39	1,92	3,85
1,0	9,0	0,45	2,22	4,44
1,25	10,1	0,50	2,50	5,00

Op eenvoudige wijze kunnen nu de volgende berekeningen worden uitgevoerd. Een versnelde beweging van 0 m/s tot v_{eind} legt dezelfde weg af als een eenparige beweging waarvan de snelheid gelijk is aan $v_{gem} = \frac{1}{2} v_{eind}$. Hieruit volgt:

$$s = v_{gem}t = \tfrac{1}{2}\, v_{eind}t$$

De snelheidsverandering in de tijd is de versnelling g:

$$\frac{\Delta v}{\Delta t} = g \quad \text{of} \quad \Delta v = gt$$

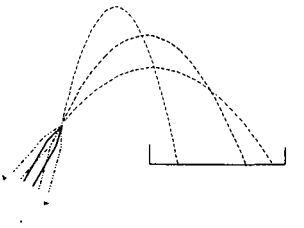
Een combinatie van beide geeft:

$$s = \tfrac{1}{2}(g \times t) \times t = \tfrac{1}{2}gt^2$$

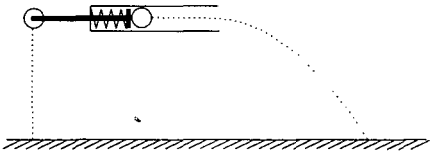
De snelheidstoename bij de eerste meting in 0,225 s bedraagt 2,22 m/s.
De snelheidstoename in de eerste hele seconde is:
$g = \Delta v/\Delta t = 2{,}22/0{,}225 = 9{,}8$ m/s.
De valversnelling of gravitatieversnelling is dus = 9,8 m/s/s.

7. Knikkers van een hoog gebouw laten vallen en de tijd en de hoogte opmeten en daaruit de valversnelling berekenen.

8. De kogelbaan.
   a. Gooi een krijtje langs het bord en teken ongeveer de baan.
   b. Neem een slang met een pipet aan het uiteinde. Hiermee kan prachtig vallend water gedemonstreerd worden.



   c. Neem een lat met een horizontaal geplaatste spuitpipet. Aan de lat hangen op gelijke afstanden met moeren verzwaarde touwtjes. De lengte van deze touwtjes neemt toe volgens de kwadratische rij. Stel de waterstraal zo in, dat de vorm van de waterboog langs de moeren beschreven wordt.
   d. Demonstreer de kogelschieter, waarbij een kogel horizontaal wordt weggeschoten en tegelijkertijd een tweede kogel verticaal valt. De gelijktijdige tik op de grond geeft aan dat beide kogels even snel vallen, ook al heeft de ene tevens een horizontale beweging. De constante horizontale beweging en de valbeweging zijn onafhankelijk van elkaar. Kogelbanen zijn parabolen. Bij deze beweging is de horizontale snelheid evenredig met de tijd en de verticale evenredig met de tijd in het kwadraat.



$$s_{hor} = v_{hor}t \qquad s_{vert} = \tfrac{1}{2}gt^2$$

Na deze reeks van proeven kan men de gevormde begrippen en afgeleide verbanden verder verdichten door het maken van opgaven.

2.7 Achtergronden en ideeënvorming

2.7.1 De kennisweg

Inzicht in verschijnselen ontstaat wanneer deze worden doorzien in hun samenhang met andere verschijnselen. In het proces om tot inzicht te komen kunnen vier fasen onderscheiden worden:*

1. De eerste stap op weg naar inzicht is dat men in staat is de verschillende facetten van een verschijnsel in ruimte en tijd te onderscheiden. Men stelt bijvoorbeeld vast dat een slinger in het hoogste punt van de ruimtelijke beweging geen snelheid heeft, terwijl de grootste snelheid wordt bereikt in het laagste punt.
2. Bij de tweede stap wordt het proces dat zich in het verschijnsel afspeelt door de mens verinnerlijkt, zodat een exacte voorstelling van dit proces uit de herinnering kan worden opgebouwd. Men is in staat een proefopstelling te maken en daaruit eenvoudige technische toepassingen te ontwikkelen. Een voorbeeld hiervan is de uitvinding van het slingeruurwerk.
3. Op het derde niveau overstijgt men het enkele fenomeen, doordat men het verschijnsel in samenhang met andere verschijnselen ziet. Men is in staat om zelf nieuwe proeven te bedenken of de bestaande proefopstelling te veranderen, opdat het verschijnsel beter tot zijn recht komt. Ook is men in staat overeenkomsten te zien tussen het betreffende fenomeen en verschijnselen uit andere wetenschapsgebieden. Als men bijvoorbeeld de grootheden slingerlengte en slingertijd in een kwadratisch of tweedemachtswortelverband zet, dan vergelijkt men de wetmatigheden van het slingerproces met begrippen die in de wiskunde zijn ontwikkeld.
4. In de vierde fase is de mens in staat het fenomeen in de eigen ziel te verbinden met scheppende, vormende krachten die én in de eigen ziel én in het fenomeen werkzaam zijn. Het verband tussen verschijnsel en omgeving wordt dan als het ware bezield. Een goed uitgangspunt vormt de vergelijking van het fenomeen met verwante verschijnselen in de ziel. Zo kan de slingerbeweging niet alleen herkend worden in de ademhaling van de mens, maar ook in de gedurige pendelbeweging waarin de ziel verkeert. Net als bij het inademen de lucht neemt de mens de zintuigindrukken in zich op, de wereld wordt ook in innerlijk opzicht ingeademd. En zoals de lucht weer wordt uitgeademd, ademt de mens ook de

* Vergelijk ook Cusanus (paragraaf 5.5.2) en de beschrijving van de fenomenologische methode in deel I, hoofdstuk 3.3.

indrukken weer uit, bevrijdt hij zich daar weer van. De fase van inademen en opnemen van indrukken gaat gepaard met een zeker gevoel van spanning: de mens moet actief met het ingeademde in wisselwerking treden. Bij de uitademing treedt een zekere ontspanning op: het moment van volledige uitademing wordt ervaren als een toestand van bevrijding, als een openstellen voor nieuwe mogelijkheden. Dit laat zich vergelijken met de slingerbeweging die zich voltrekt tussen de polariteiten beweging en rust, waarbij de toestand van de grootste beweging overeenkomt met het bereiken van het diepste punt en die van rust met de grootste hoogte en wijdte, tussen een bewogen wórden en kunnen gáán bewegen, tussen actie en potentie.
Verbindt men op een dergelijke wijze zielekrachten met wereldkrachten, dan scherpt men de blik voor de laatste. Men zou kunnen zeggen dat de blik bezield wordt voor het waarnemen van de wezenlijke samenhang tussen fenomeen en wereld.

Voor niveau drie wordt de term verstandsdenken gebruikt, voor niveau vier de woorden imaginatie of intuïtie. Dit vierde niveau is voor de huidige mens nog moeilijk bereikbaar en nog volop in ontwikkeling. Als die ontwikkeling doorzet zal het in de toekomst net zo vanzelfsprekend worden en tot de normale verworvenheden gaan behoren als het verstandsdenken in de afgelopen 700 jaar.

Denken kunnen we omschrijven als het zien van samenhangen in de wereld van de waarneming. De waarneming komt door de zintuigen tot de mens, terwijl de gedachten die de samenhang openbaren in het eigen innerlijk gevonden worden. Langs puur innerlijke weg kan ook de wiskunde ontwikkeld worden. De verbanden in de wiskunde kan men vergelijken met wetmatigheden in een verschijnsel. Bijvoorbeeld: in een rechthoekige driehoek verhouden de rechthoekszijden zich als 3 : 1

$a = 3, 6, 9, 12$ etc.

$b = 1, 2, 3, 4$ etc.

Deze getallenreeksen staan in een lineair verband tot elkaar. Zoeken we naar het wetmatige verband tussen afstand en tijd bij een constante snelheid, dan kunnen we dit vergelijken met een lineair verband. De snelheid v is de constante verhouding tussen de afstand s en de tijd t.

In deze periode is het belangrijk aan de leerlingen te laten zien dat wat de mens wiskundig - dus helemaal innerlijk - denkend kan ontwikkelen, dezelfde oorsprong heeft als de wetmatigheden die in de verschijningswereld werken, die denkend aan de waarneming ontwikkeld kunnen worden. Gedachten zijn beelden van de scheppende, ordenende wereldkrachten, die impulserend en structurerend in de wereld werken. Wiskundig denken we

deze krachten direct. Natuurwetenschappelijk kunnen we ze denkend aan de waarneming van de verschijnselen ontdekken.

2.7.2 Beweging en de cyclus van het kenproces

Het sterkst in de pedagogie werkt datgene wat de leerkracht werkelijk is, wat hij ervarend en belevend denkt. Rudolf Steiner wijst in dit opzicht steeds weer op de noodzaak het materialisme te overwinnen, onder andere in de laatste voordracht van *Algemene menskunde**. Het maakt een groot verschil of de leerkracht verkondigt "meten is weten", of dat hij zegt "meten is vergeten", namelijk vergeten wat de natuur werkelijk is. We moeten meten, maar na deze reductie moet een inductie volgen om ons in de geest met de stof te kunnen verbinden.

Voordat we tot het meten overgaan zullen we eerst aansluiting moeten zoeken met de gewaarwordingen van de omgeving en de eigen belevingen van de leerlingen. Het thema beweging is zo'n gebied van gewaarwordingen dat dicht bij de mens staat. Komen we te spreken over een hardloopwedstrijd, dan kan iedereen daar gelijk in meekomen. Op het moment dat men de overgang maakt naar het meten aan de beweging, moet men de leerlingen erop wijzen, dat we ons door te meten buiten het proces houden en ons alleen fixeren op het begin- en eindpunt van de beweging. Mijn meevoelende interesse in de hardloopster en mijn metingen aan afstand en tijd staan polair tegenover elkaar. Interesse betekent er tussen zitten, deelnemen aan het proces, en speelt zich af in het nu. Meten houdt in er buiten staan en alleen naar de uiteinden van het proces kijken. Zo is ook een tooninterval een proces, waarvan de tonen de uiteinden zijn. Eerst doordat de verhouding van afstand en tijd mij iets zegt en hierdoor het begrip snelheid kwantitatief wordt vastgelegd, ontstaat weer een verbinding tussen de beleving en de voorstelling. Het denken bevrijdt de geïsoleerde voorstellingen via het begrip en maakt een reële verbinding met de direct beleefbare wereld mogelijk.

het intuïtieve denken

↑

schijnbare tegenstelling tussen denken en waarnemen;
door de mens worden beide gescheiden, maar ook weer verbonden

↓

de belevingswereld

* Rudolf Steiner: *Algemene menskunde als basis van de pedagogie.*

Beweging is zo met de mens verbonden, dat hij er niet buiten kan gaan staan. Alleen de kwaliteiten afstand en tijd kunnen we tegenover ons plaatsen. Die moet de mens eerst ervaren en maatloos waarnemen, alvorens hij een maat-eenheid kan vastleggen. Hiervan is te leren dat de menselijke ziel niet zelf tijd en ruimte is, maar zich in tijd en ruimte manifesteert. Snelheid echter kan niet direct gemeten worden. Maar de menselijke ziel is wel inherent verbonden met snelheid en versnelling. Daarom kunnen deze kwaliteiten alleen indirect vastgelegd worden.

Geen enkele maat-eenheid is in de natuur te vinden, elke eenheid moet door een afspraak tussen mensen worden vastgelegd. Dit kan als volgt in beeld worden gebracht:

de **kwaliteit** afstand is in de natuur ervaarbaar	de **eenheid** van afstand is een afspraak	de **naam** van de eenheid is een geïncarneerd begrip
s	**l**	**meter**

Zowel voor het meten, wegen als tellen geldt dat de mens op de hier aangegeven wijze objectief tegenover de wereld kan gaan staan, zodat een eigen binnenwereld tegenover de natuur wordt gecreëerd. Kleine kinderen beleven dit intens wanneer ze leren tellen. Op de leeftijd van de 10e klasser is het probleem echter, dat de leerlingen ervaren dat het meten belevingsloos is, evenals het begrip dat ontwikkeld wordt. Dat het begrip de belevingswereld doorlicht en een nieuwe verbinding met de wereld aangaat zou daarom expliciet naar voren moeten komen door de wijze waarop men de stof behandelt. Te gauw blijft men echter in het oefenen van opgaven steken, terwijl de menskundige achtergrond ondoorzichtig blijft voor leraar en leerling. Want denken is een weg van de eenzaamheid. Maar al denkende kan een brug worden geslagen van het eigen innerlijk naar het wezenlijke van natuur en kosmos. Wanneer de leraar de waarde van het denken kent, dan hoeft hij niet bang te zijn de abstractie in te gaan, omdat door de abstractie heen de kern van de wereld in het eigen innerlijk gevonden wordt.

2.7.3 Snelheid en versnelling

In onze fantasie, in onze voorstellingen en ons gemoed, is een en al innerlijke beweging. Men zou kunnen zeggen dat innerlijke beweging het draagvlak van de ziel is. Zoals in de natuur de stoffelijkheid - en binnen de stoffelijkheid vooral de vaste stof - het draagvlak vormt voor de natuurlijke processen, zo vormt het bewegingselement het draagvlak voor de zielepro-

cessen. Anders gezegd, beweging is de substantie van de ziel. Vandaar dat voor de beleving uiterlijke beweging heel toegankelijk is.

Het vastleggen van een beweging doen we door uit de beweging te gaan, namelijk door de fixatie van begin- en eindpunten. Zoals we hiervoor hebben gezien is het meten van afstand en tijd een afstandelijke activiteit. Hieruit vinden we het begrip gemiddelde snelheid. Vervolgens kunnen we een stap verder doen, dan ontstaan nieuwe begrippen. Neemt bijvoorbeeld de snelheid evenredig met de tijd toe, dan concluderen we: $\Delta v/\Delta t$ = constant. Deze constante noemen we de versnelling a.

Deze opbouw is in overeenstemming met de menskunde en verschilt van de gangbare, waar eerst afstand en tijd gedefinieerd worden, terwijl snelheid en versnelling daar als begrippen aan toe worden gevoegd:

- gangbaar: definitie afstand en tijd → begrippen snelheid en versnelling;
- vanuit de menskunde: beleving → beweging
  meting → afstand en tijd
  begrip → gemiddelde snelheid, versnelling.

De relatie tussen de *kwantiteiten* afstand en tijd is een maat voor de *kwaliteit* snelheid, die daarmee als (gemiddelde) waarde kan worden vastgelegd:

$$s \propto t$$
$$s = \text{constante} \times t$$
$$\text{constante} = v_{\text{gem}} = s/t$$

Het begrip versnelling ontstaat door naar de snelheidsverandering ten opzichte van de tijdsverandering te kijken:

$$\Delta v \propto \Delta t$$
$$\Delta v = \text{constante} \times \Delta t$$
$$\text{constante} = \frac{\Delta v}{\Delta t} = a \text{ (versnelling)}$$

We schrijven de versnelling a achter de formule om te laten zien dat het *begrip* versnelling *gevonden* wordt uit het quotiënt, terwijl we de gemiddelde snelheid v_{gem} vóór de formule s/t schreven om aan te geven dat de beleefbare kwaliteit snelheid wordt *vastgelegd* door de abstracte grootheden afstand s en tijd t.

2.7.4 Beweging als autonome werkelijkheid

Sinds enkele eeuwen treedt in het bewustzijn van de westerse mensheid één hechte en reële werkelijkheid steeds meer op de voorgrond: de

werkelijkheid van de stof, van de materie. De materie vormt het fundament waar we op kunnen bouwen, wat ten grondslag ligt aan alle natuurverschijnselen, waar de wereld uit voortkomt. Dit paradigma van het materialisme is universeel, het heeft het gehele denken doordrongen, zodat denken in niet-materiële grootheden nauwelijks als realiteit kan worden ervaren. De mens is er ook in volle zin aardeburger door geworden.

Bewegingsverschijnselen zijn in dit denken niet alleen aan (bewegende) dingen gebonden, ze worden bovendien beschouwd als teweeggebracht door aan materie verbonden krachten. Dat iets beweegt moet een oorzaak hebben, en die oorzaak, zij het een botsing van deeltjes, zij het de werking van een gravitatie- of ander veld, ligt uiteindelijk in iets materieels besloten. Niet altijd is dit de gangbare denkwijze geweest. Zo verstonden bijvoorbeeld de Aristotelici onder beweging elke overgang van "potentie" naar "act", van mogelijkheid naar realisatie. Zij onderscheidden daarbij de volgende veranderingen, "bewegingen":

substantiële verandering:
- ontstaan (generatio)
- vergaan (corruptio)

accidentele verandering:
- kwalitatief veranderen (alteratio), bijvoorbeeld verdamping
- kwantitatief veranderen (augmentatio of diminutio), bijvoorbeeld slijtage
- veranderen van plaats (motus localis).

Het bewegingsbegrip was hier dus veel ruimer en van veel fundamenteler karakter.

De tijd lijkt gekomen dat het denken uit zijn nauwe materialistische ketenen wordt bevrijd De mens is aan het op zichzelf gesteld zijn ontwaakt en toe aan een volgende ontwikkelingsstap. Daarbij kan hij, steunend op het zekere fundament dat zijn geschoolde denkvermogen hem biedt, opnieuw de blik richten op de wereld, inclusief zichzelf. Hij kan tot de erkenning komen dat hij als mens méér is dan een functionerend lichaam met energetische afscheidingen als gevoel, gedachten, intenties, moraliteit. Hij hoeft zijn zelfstandigheid, zijn ik-beleven niet te verloochenen door het primaat van de materie op te geven en aan niet-materiële factoren van het leven een eigen bestaansrecht toe te kennen.

Dat geldt ook voor de natuurbeschouwing. De noodzaak om alle natuurverschijnselen aan de materie te binden kan losgelaten worden, zodat ze met een zekere onbevangenheid opnieuw kunnen worden waargenomen. Dan blijkt dat bewegingsverschijnselen als de vrije val en de planetenbewegingen in hun wetmatigheden volledig te beschrijven zijn door alleen de beweging in ogenschouw te nemen. De begrippen kracht, materie, massa, volume, kleur, enz. spelen hierbij geen noodzakelijke rol. De vrije val is een gewichtsloze val, waarbij alle voorwerpen dezelfde versnelling krijgen

zolang ze gewichtsloos blijven, dat wil zeggen niet in hun val worden afgeremd; hij is als puur bewegingsfenomeen te beschrijven.

Zo kijkend komt men ertoe het gravitatieveld van de aarde als een autonome werkelijkheid te zien, die weliswaar in samenhang staat met gewichtfenomenen, massa, traagheid, e.d., maar daarmee nog geen afgeleide daarvan is. Evenzo is het verschijnsel van de planetenbewegingen als een autonome realiteit te zien, beschreven in de wetten van Kepler, geen afgeleid maar een primair fenomeen, waarin een bewegingsrealiteit, samenhangend met andere realiteiten in de natuur, zich uitspreekt. Door in de natuurkunde de zelfstandigheid van de beweging ten opzichte van de materie te herkennen, kan de weg gebaand worden om ook in het menselijke de zelfstandigheid van de ziel ten opzichte van het lichaam realiteitswaarde toe te kennen.

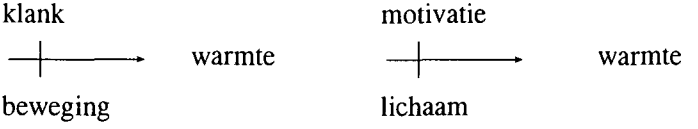
2.7.5 Resonantie

Bij de beschouwing van de proeven met geluid is het van wezenlijk belang expliciet onderscheid te maken tussen de ritmisch bewegende lucht en de beleefbare toon. Deze uiterlijk meetbare en innerlijk beleefbare werkelijkheden hangen nauw met elkaar samen. Zij vormen in hun afgestemd zijn op elkaar een eenheid. Dit is zo sterk, dat de gangbare natuurkunde de beleefbare toon over het hoofd ziet en als een subjectieve toevoeging afdoet. Toonbeleving en beweging vormen twee sferen of krachtvelden, die met elkaar samenhangen en ook in de natuur buiten ons met elkaar verbonden zijn, de eerste van tastbare, ponderabele, de tweede van imponderabele aard. De beleving bijvoorbeeld dat men door te spreken of te zingen zo groot wordt als de hele ruimte, dat men de ruimte innerlijk vult, moet serieus genomen worden als een feitelijke waarneming. Trilling en klank horen bij elkaar als lichaam en ziel.

Resonantie in uiterlijke zin wordt hoorbaar bij twee identieke stemvorken. Resonantie in figuurlijke zin doet zich voor in ieder goed gesprek. Beide soorten waarnemingen moeten als feitelijk genomen worden. De huidige zintuigleer maakt een holistische visie bij voorbaat onmogelijk, daar alleen de meetbare trilling als reëel in de ruimte werkzaam genomen wordt en de beleving als een toevoeging die slechts in de mens aanwezig is.

Naast de toon als innerlijke kwaliteit en de beweging als uiterlijke tastwaarneming treedt er ook een adiabatisch warmteproces op, dat zich in samenhang met de beweging door de ruimte heen verplaatst. De ritmische bewegingen in de lucht brengen continu compressie en expansie van lucht tot stand, waardoor respectievelijk verhitting en afkoeling ontstaat. Zoals bij de 9e klas werd besproken (zie deel I, hoofdstuk 4.6) is warmte het element dat op de grens tussen het ruimtelijke en het onruimtelijke verschijnt. Bij trilling

en klank vormt de warmte de bemiddelaar tussen de uiterlijke, ruimtelijke beweging en de innerlijke, onruimtelijke beleving. Dit laat zich vergelijken met een mens die zin krijgt iets te ondernemen en daarvoor innerlijk en uiterlijk warm loopt.



Klank heeft geen snelheid, alleen de warmtestroom, de bewegende lucht en de trillende snaar hebben snelheid. De toon openbaart zich overal daar in de ruimte waar de voorwaarden van een dynamische beweging vervuld zijn. De toon is onruimtelijk en raakt voor één moment de ruimte als het ware aan. Spreken over geluidssnelheid heeft het gevaar in zich om het wezenlijke van het geluid onbesproken te laten. Men kan daarom beter spreken van de uitbreidingssnelheid van de bewegingen in de lucht.

2.7.6 De eenheid van afstand

In het verleden waren er streek- en landgebonden afspraken over de eenheden van lengte en gewicht. Eenheden van lengte waren bijvoorbeeld de duim, el, palm, voet en de vadem. In Nederland gold voor "1 uur gaans" een afstand van 5,556 km. In Engeland werd de inch vastgelegd als de lengte van drie naast elkaar gelegde rijpe gerstekorrels uit het midden van een aar. De "voet" werd vastgelegd als de gemiddelde voetlengte van 12 mannen die zondags na elkaar uit de kerk kwamen. De "palm" was één handbreedte zonder de duim en was vier duimen groot.

In 1791 werd door Lodewijk XVI bepaald dat vijf geleerden van de Académie des Sciences een algemene lengtemaat zouden vaststellen die de "meter" genoemd zou worden. De initiatiefnemer van dit plan was C. de Talleyrand-Perigord (1754-1838). Deze ex-bisschop en diplomaat overleefde alle franse regimes en was er vast van overtuigd dat je met een bij de situatie passende maat moet meten. Nog in datzelfde jaar werd voorgesteld om 1/40-miljoenste deel van de aardomtrek, gemeten over de polen en Parijs, als de meter vast te leggen. Nu was het mogelijk 9 booggraden van de aardomtrek (dat is 1/40 deel ervan, dus per definitie 1.000.000 m) op te meten, namelijk de afstand van Duinkerken tot ongeveer Barcelona. Twee landmeters voerden deze opdracht nauwgezet uit met behulp van driehoeksmeting. In zes jaar tijd voltooiden zij hun werk. Als eenheid gebruikten zij de toen gangbare "toise". Zij kwamen op 513.074 toise en de meter was dus 0,513074 toise.

In 1799 werd de meter officieel ingevoerd door middel van een platina-eindmaat (staaf van precies de lengte van een meter). Dit was de standaardmeter die heel zorgvuldig in het Institut des Poids et des Mesures te Sèvres bij Parijs werd bewaard. Afgeleide maten als de vierkante en kubieke meter en de kilogram als maat voor het gewicht van 1 liter water van 4 °C werden algemeen in gebruik genomen. In 1872 werd de lat vervangen door een stevige platina-iridium staaf met een kruisvormige doorsnede, waarop twee krasjes op een afstand van precies één meter werden gezet. Hiervoor werd de grootste hoeveelheid platina ooit bijeen gebracht gesmolten. Echter, enige jaren later werd ontdekt dat de twee landmeters naast mogelijke meetfouten duidelijk aanwijsbare rekenfouten hadden gemaakt. Een conferentie werd in 1875 belegd en daar werd besloten dat de afstand tussen de krasjes op de platina staaf de meter was en verder niets. Na de wereldoorlogen, toen er reeds vele kopieën van de platinameter waren gemaakt, heeft men in 1960 tijdens de 11e Meet- en weegconferentie de meter nogmaals veilig gesteld. Vastgelegd werd dat 1650763,73 maal de golflengte van de oranje-rode spectraallijn van het element krypton overeenkomt met 1 meter. Hiermee mag duidelijk zijn geworden, dat de eenheid van lengte een vrij te kiezen afstand is die niet in de natuur is verankerd.

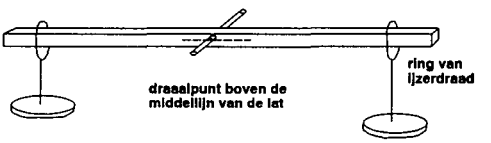
3. KRACHTEN

3.1 Algemeen: hefboom, balans, diverse toepassingen

Krachten vragen erom om direct aan den lijve ervaren te worden. Dit in tegenstelling tot de bewegingsleer, die veel sterker vanuit de voorstelling behandeld kon worden. Een goede introductie van het thema krachten bieden de *balans* en de *hefboom*.

Neem een lange lat (circa 2 m) en laat een leerling deze als een juk op de nek nemen, terwijl twee anderen de uiteinden verticaal naar beneden trekken. Laat de leerlingen ook horizontaal aan de uiteinden trekken. Vervolgens kan men de proef herhalen, waarbij de middelste leerling de lat nu niet meer in het midden steunt. Ervaringen: Bij verticale krachten aan de uiteinden moet de middelste leerling beide anderen weerstaan en dus alléén net zoveel doen als de twee anderen samen. Bij horizontale even sterke krachten hoeft de middelste niets te doen. Wordt de lat uit het midden gesteund, dan hoeft die leerling waarvan de afstand tot de dragende groter is minder te doen.

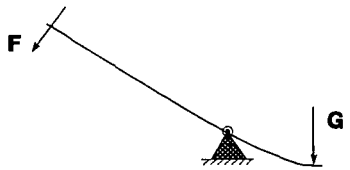
Hang de lat nu aan een statief met een mof als draaias en hang met behulp van ringen van ijzerdraad twee even zware gewichten aan de uiteinden. Verschuif de ringen vervolgens, terwijl er gewichtschijven worden toegevoegd.



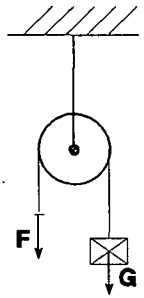
Er kunnen nu enige toepassingen van *hefbomen* besproken worden, zoals koevoet, kruiwagen e.d. Daarbij is na te gaan dat er in feite slechts drie verschillende situaties mogelijk zijn van steunpunt en krachten.

1. ***Steunpunt tussen twee krachten:*** bijv. koevoet, vaste katrol, kleminrichting.

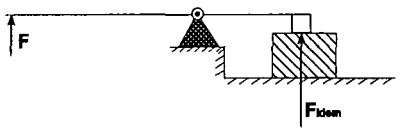
koevoet
Er wordt met een kracht *F* aan de koevoet getrokken en er kan een zwaar gewicht *G* worden opgetild.



vaste katrol
De trekkracht *F* is gelijk aan het gewicht *G*.



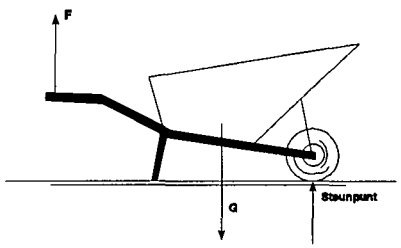
kleminrichting
Wanneer het blokje de naar beneden gerichte klemkracht weerstaat, dan is de kracht van het blokje op de hefboom dus omhoog gericht.



Afspraak: we tekenen de krachten op een voorwerp altijd zoals ze op dat voorwerp inwerken. Dus niet wat het voorwerp op de omgeving doet wordt getekend, maar wat de omgeving doet op het voorwerp.

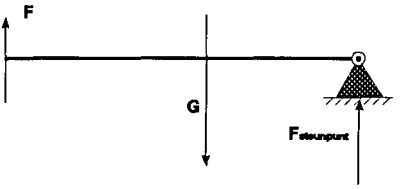
2. ***Steunpunt en werkende kracht aan de uiteinden:*** bijv. kruiwagen, losse katrol, windas.

kruiwagen
De hefkracht *F* en het gewicht *G* staan in een bepaalde relatie tot elkaar, maar *F* is in ieder geval kleiner dan *G*.



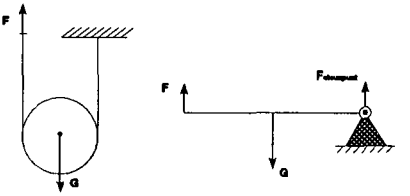
De steunpuntskracht, die de grond op het kruiwagenwiel uitoefent, draagt G niet alleen, de kruiwagenrijder draagt ook:

$$F_{\text{steunpunt}} = G - F$$



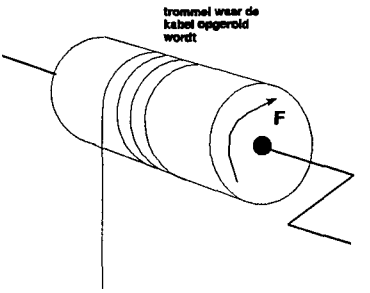
losse katrol
De trekkracht F en de steunpuntkracht F_s dragen samen het gewicht G en zijn gelijk in grootte:

$$F + F_s = G \quad \text{en} \quad F = F_s$$

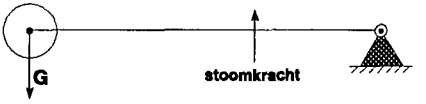


Algemeen:
wanneer ergens in een touw een kracht werkt, dan werkt die kracht in het hele (gespannen gedeelte van het) touw.

windas (hijsinrichting voor een waterput, lier).
Afhankelijk van de lengte van het hengsel in verhouding tot de straal van de trommel zal de draaikracht F in ieder geval kleiner zijn dan het gewicht G.



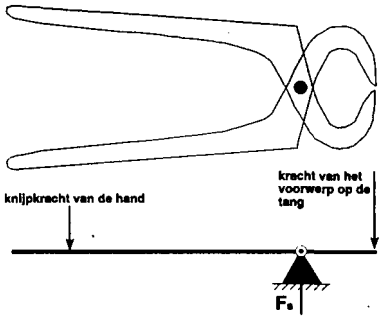
3. ***Werkende kracht in het midden:*** bijv. ***veiligheidsklep*** (pot van Papin).
In dit geval moet de werkende kracht groter zijn dan het gewicht G.



Van de drie bovenbeschreven situaties bestaan ook *dubbele hefbomen*, waarvan hieronder voorbeelden.

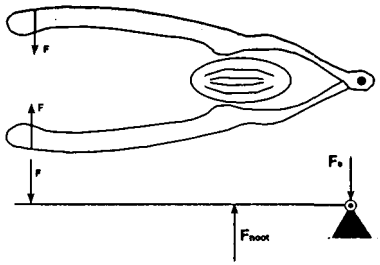
ad 1. ***tang***
In het schema worden alleen de krachten op de gearceerde helft van de tang weergegeven. In het scharnierpunt S is de kracht het grootst:

$$F_s = F_{knijp} + F_{voorwerp}$$

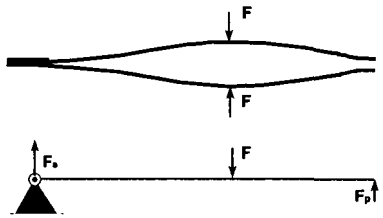


Het is belangrijk erop te wijzen dat de andere helft van de tang de kracht op het voorwerp niet verdubbelt, maar dat de hand, de tang en het voorwerp ieder voor zich een gesloten krachtensysteem is. De knijpkracht van de hand op de tang boven is gelijk maar tegengesteld aan die van onder. Ook in het scharnier zal de ene helft zich afzetten tegen de andere helft. Ook de kracht van de hand op de tang en die van de tang op de hand zijn even groot en tegengesteld. De actieve kracht van de hand en de kracht waarmee de tang deze weerstaat zijn afhankelijk van elkaar: de hand kan niet harder knijpen dan de tang kan weerstaan. Deze weerstand biedende kracht noemen we de reactiekracht. De actie van de hand wordt begrensd door de reactiemogelijkheid van de tang. De reactie begrenst aldus de actie. Het voorbeeld van een bevroren of een week pakje boter is zeer sprekend: op de weke boter kan een actiekracht nauwelijks ontwikkeld worden.

ad 2. ***notenkraker***
De noot duwt en weerstaat de invloed van de actiekracht *F*. De actie *F* wordt weer begrensd door de reactiemogelijkheid van de noot.

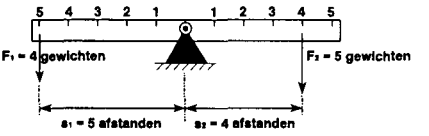


ad 3. ***pincet***
De actiekracht van de hand roept weer een reactiekracht van de postzegel of de splinter op.
Deze situatie kan in het groot worden gedemonstreerd met behulp van twee latten met een bout als scharnierpunt.



Na bespreking van deze voorbeelden van hefbomen kunnen we terugkeren naar de *balans* en proefondervindelijk de verhoudingen van afstand en kracht vaststellen. De wetmatigheid die de leerlingen al snel ontdekken is de volgende: krachten en afstanden zijn omgekeerd evenredig met elkaar. Dit wordt ook de gulden regel genoemd: wat men wint aan kracht verliest men aan afstand, en omgekeerd:

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{F_2}{F_1}$$



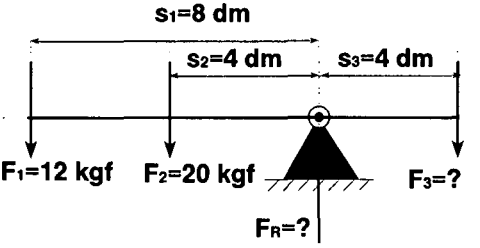
Deze verhoudingen zijn aan elkaar gelijk en dimensieloos. Dit verandert als we de verhoudingen omschrijven naar producten:

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{F_2}{F_1} \quad \rightarrow \quad s_1 \cdot F_1 = s_2 \cdot F_2$$

Het product van afstand en kracht aan beide kanten van het draaipunt is gelijk. Dit product krijgt een naam: moment (*M*) of koppel en heeft de eenheid kgf·m (voorlopig wordt als eenheid van kracht de kilogramforce (kgf) gebruikt, omdat die in het dagelijks leven gebruikelijk is). Onder het begrip moment kan verstaan worden het effect van een kracht om een draaipunt. Bij alle genoemde voorbeelden hebben we te maken met een evenwicht van momenten. Daarom kan men zo'n moment ook een (statisch) moment noemen.

statisch moment = kracht × statische afstand (kracht ⊥ afstand)

Als volgende stap kan de balans met meer dan twee krachten behandeld worden. Het steunpunt S kiezen we voorlopig ook als draaipunt voor het bepalen van de evenwichtstoestand (dit is niet noodzakelijk, want hiervoor zou ieder punt in de ruimte of van de balansarm gekozen kunnen worden).



Hoe groot moet F_3 zijn om de balansarm in evenwicht te houden?
Er zullen twee oplossingsmethoden besproken worden:

a. Vanuit de dimensieloze verhoudingen gaat dit als volgt:

Stel alleen F_1 moet in evenwicht gehouden worden, dan geldt:

$$\frac{S_1}{S_3} = \frac{8}{4} = 2 = \frac{F_3}{F_1} \rightarrow F_3 = 2F_1 = 24 \text{ kgf}^*$$

Om alleen F_2 in evenwicht te houden, geldt voor F_3:

$$\frac{S_2}{S_3} = \frac{4}{4} = 1 = \frac{F_3}{F_2} \rightarrow F_3 = F_2 = 20 \text{ kgf}$$

Om beide krachten F_1 en F_2 in evenwicht te houden moet F_3 gelijk aan 24 + 20 = 44 kgf zijn.

Het steunpunt moet alles dragen dus

$$F_R = F_1 + F_2 + F_3 = 12 + 20 + 44 = 76 \text{ kgf}$$

b. Oplossing met statische momenten:

F_1 en F_2 zouden de balans tegen de klok in willen doen ronddraaien. Alleen door F_3 zou de balans met de klok mee willen gaan draaien. Bij statisch evenwicht is de som van alle momenten linksom gelijk aan de som van alle momenten rechtsom eenzelfde draaipunt:

$$\Sigma M_l = \Sigma M_r$$

Dit levert:

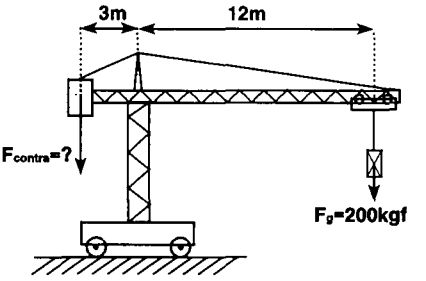
$$F_1 \times s_2 + F_2 \times s_2 = F_3 \times s_3$$
$$12 \times 8 + 20 \times 4 = F_3 \times 4$$
$$F_3 = 44 \text{ kgf}$$

Voor de steunpuntkracht F_r geldt dezelfde berekening als onder a.

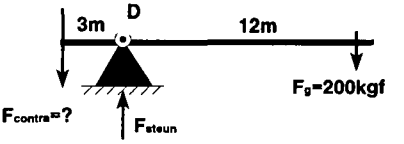
* Over het gebruik van kgf als eenheid van kracht zie paragraaf 3.4.6 en paragraaf 4.3.

Vervolgens kunnen er allerlei mechanische werktuigen en statische constructies besproken en berekend worden, zoals hijskranen, bruggen, viaducten, dakconstructies. Als voorbeeld wordt een hijskraan bekeken:

Hoe groot moet het contragewicht zijn om evenwicht te krijgen in de arm?



Maak een schematische tekening van alleen de bovenarm:



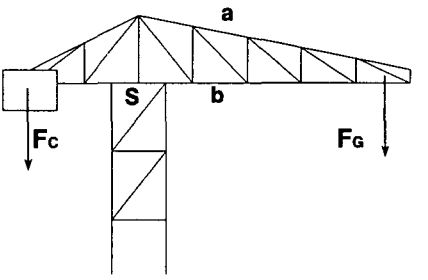
$$\Sigma M_l = \Sigma M_r$$

$$F_{contra} \times 3 = 200 \times 12$$

$$F_{contra} = \frac{200 \times 12}{3} = 800 \text{ kgf}$$

De steunpuntskracht $= F_{contra} + F_g = 800 + 200 = 1000$ kgf.

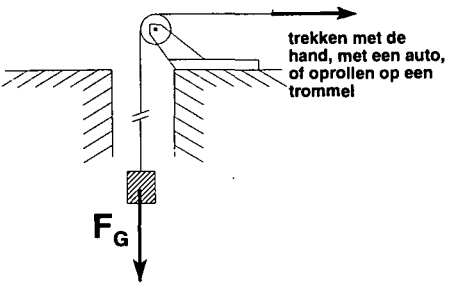
Vooruitlopend op het volgende onderwerp over het ontbinden van krachten kan hier gesproken worden over het vakwerk (vormvaste driehoeken) en over de trekstangen in de nok, waardoor er in plaats van buiging drukkrachten in de arm komen. Zonder trekstangen zou de arm er ongeveer als volgt uit moeten zien:



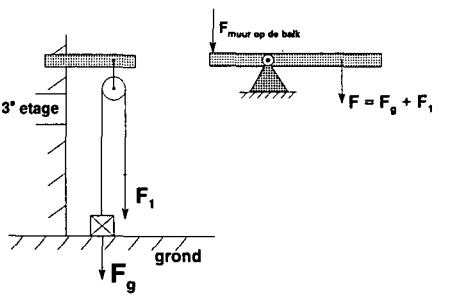
Om te ontdekken wat voor krachten er in de constructie werken kan men de vraag stellen: wat zou er gebeuren als de constructie op een bepaalde plaats wordt doorgezaagd? Wordt de zaagsnede verder open getrokken? Dan werkt daar een trekkracht. Wordt de zaagsnede dichtgedrukt? Dan werkt daar een drukkracht. Hoe zal nu de rest van de constructie reageren? In bovenstaande arm, die in S het sterkst op buiging belast wordt, treden aan de bovenkant (a) trekkrachten en aan de onderkant (b) drukkrachten op.

Desgewenst kan op het onderwerp katrollen en takels nog nader worden ingegaan. Wanneer een zwaar gewicht omhoog of omlaag gebracht moet worden, dan gebruikt men hiervoor vaak een takel. Enkele voorbeelden.

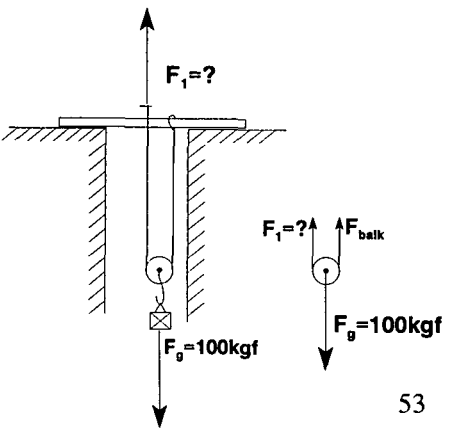
a. Uit een diepe put wil men iets omhoog brengen: het katrol wordt gebruikt om de krachtrichting te veranderen van verticaal naar horizontaal.



b. Een kist wordt naar de derde verdieping van een flat gehesen. De kracht F_1 is gelijk aan F_g (eigenlijk is F_1 iets groter in verband met de wrijving en het in beweging komen). Het katrol zorgt weer voor de richtingverandering van de kracht. De draagarm van het katrol moet de gewichtskracht en de trekkracht tezamen weerstaan.



c. Men staat boven een last en hijst deze op met behulp van een los katrol. Het losse katrol wordt belast door het gewicht F_g (dat nu niet direct aan het hijstouw zit) en door het hijstouw. De beide krachten in het linker- en rechterdeel van het touw, F_1 en F_{balk}, dragen samen F_g en zijn dus beide 50 kgf.

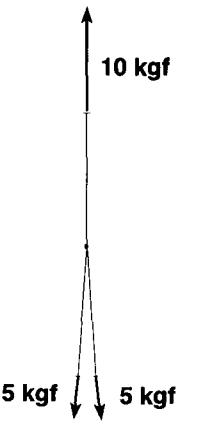


Het hijsen gaat dus twee keer zo gemakkelijk, maar men moet ook twee keer zoveel touw innemen.

Deze proeven met katrollen kunnen net als bij de balans weer heel eenvoudig met drie leerlingen worden uitgevoerd in een horizontale opstelling.

3.2 Het samenstellen en ontbinden van krachten

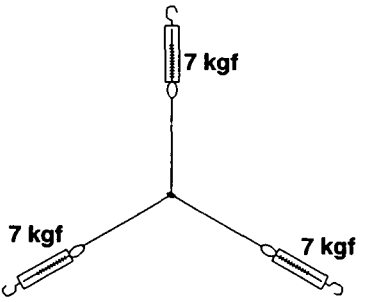
Neem een drietal touwen die in een punt aaneengeknoopt zijn. Drie leerlingen kunnen hieraan trekken onder verschillende hoeken ten opzichte van elkaar. Ga na een korte ervaringsoefening over tot het systematisch meten met behulp van veerunsters. Men kan de situatie hiernaast als uitgangspunt nemen.



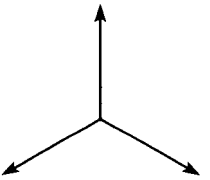
Laat nu de leerlingen 2 en 3 uit elkaar gaan, terwijl ze een kracht van 5 kgf blijven uitoefenen. Leerling 1 moet zich aanpassen. De ervaring leert dat leerling 1 steeds minder heeft te doen.

Het is een aardig spel om bij de volgende opdracht de leerlingen eerst wat op het verkeerde been te zetten, door twee van de drie leerlingen dicht bij elkaar tussen de tafels in het lokaal te zetten en de derde ergens anders. De opdracht luidt dan: zorg ervoor dat jullie alle drie met een kracht van 7 kgf trekken. Na enige discussie en hulp van andere leerlingen ontstaat een regelmatige driester.

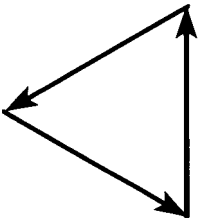
Bij het verwerken van de waarneming lijkt dit een goed moment om de leerlingen te wijzen op de verschillende stadia van abstractie. Als begin kan men ze een tekening in het schrift laten maken van de drie proefpersonen bezig met de proef, een soort foto-tekening. Zo'n tekening hebben we hier niet weergegeven. Als tweede stap kan dan een bovenaanzicht als hiernaast gemaakt worden; hierin zijn nog de fysieke dingen te zien, touwen en unsters. De proefpersonen zijn al weggelaten.



De derde stap is dan dat de krachten symbolisch weergegeven worden. Dat gebeurt op een heel natuurlijke manier met pijlen die groter zijn naarmate de kracht groter is. Verder kan bij deze figuur vermeld worden dat de krachten altijd in de richting van de touwen staan. De figuur is in dit stadium al in het abstracte wiskundige stadium beland.

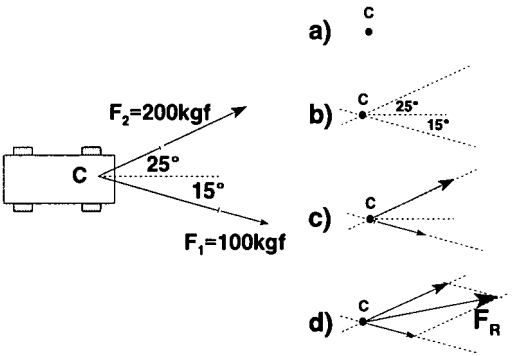


Tenslotte kan je nu de krachten pijlen evenwijdig verschuiven totdat ze een gesloten figuur vormen. In de figuur wordt dan op een wiskundige manier duidelijk dat er hier sprake is van een evenwichtssituatie.



gesloten pijlenfiguur ↔ evenwicht van krachten

In plaats van het samenstellen van twee krachten tot een resultante kan een kracht ook ontbonden worden in twee krachten die samen hetzelfde effect opleveren. Verder kan het principe van het samenstellen of ontbinden van krachten ook worden toegepast op voorwerpen die met een constante snelheid bewegen, daar in zulke gevallen de weerstandskrachten het krachtensysteem sluiten. Er zullen enige voorbeelden besproken worden.



1. Een auto zit vast in de modder. Met behulp van touwen wordt er in twee richtingen aan de auto getrokken. Bepaal de resulterende kracht op de auto, waarbij we ervan uitgaan dat de auto niet in beweging komt:

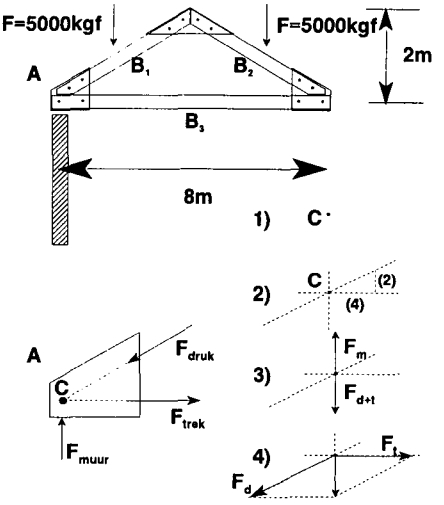
a. Bepaal C.

b. Teken de werklijnen (een kracht mag langs zijn werklijn verplaatst worden, zonder dat de invloed ervan verandert).

c. Teken de krachten op schaal.
d. Stel de krachten samen tot de resultante F_r.
e. Meet en bereken deze kracht F_r.
f. F_r werkt als actiekracht op de auto en roept een reactiekracht op.

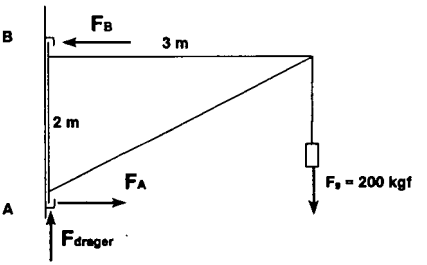
2. Een dakspant ligt op een muur en is door sneeuw en eigen gewicht belast met een kracht F. In A zijn de balken met behulp van een verbindingsplaat verbonden. In de balken B_1 en B_2 werkt een druk- en in B_3 een trekkracht. Hoekpunt A wordt dus als volgt belast:

De constructie moet zo gemaakt worden dat op de muur alleen een verticale, geen zijwaartse kracht werkt. De drie getekende krachten F_d, F_t en F_m houden elkaar dus in evenwicht. Dit betekent dat de resultante van de druk- en de trekkracht even groot maar tegengesteld is aan de kracht van de muur: deze kan op de geschetste wijze geconstrueerd worden.



3. De wandkraan. Dit is eigenlijk een grote boekenplank. De krachten die hier werken, kunnen langs twee wegen gevonden worden:
a. Door het ontbinden van krachten:
In punt A wordt de wandkraan en het gewicht F_g gedragen en duwt de wandkraan zich tegen de muur. Bij B moet de wandkraan vastgehouden worden want daar wordt de bevestiging de muur uitgetrokken.
b. Met behulp van momenten:
De krachten bij A en B geven een linksdraaiend moment. F_g geeft een rechtsdraaiend moment, dat even groot is. Wat als draaipunt genomen wordt, maakt niets uit. We kiezen hier voor het punt B, zodat het duidelijk is dat de arm van F_g 3 m is:

$$M_l = M_r$$
$$F_A \cdot 2 = F_g \cdot 3$$
$$F_A = \frac{200 \cdot 3}{2} = 300 \text{ kgf}$$
$$F_B = F_A = 300 \text{ kgf}$$



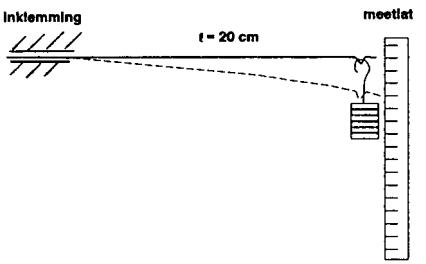
3.3 Kracht en vormverandering

In 1678 ontdekte de engelsman R. Hooke dat elastische vormveranderingen evenredig zijn met de uitgeoefende kracht. Deze evenredigheid geldt zowel voor verlenging als draaiing (torsie), verschuiving en buiging.

Als inleiding op dit thema kan men de tegenstelling bespreken tussen de onzichtbare krachtstructuur en de meetbare vormverandering. Bijvoorbeeld: hoe zie je aan een brug hoe zwaar deze belast is? Of hang een staaf, touw of draad op, waarvan het begin- en uiteinde niet te zien zijn en vraag, hoe men alleen aan het zichtbare stuk kan onderzoeken hoe groot de krachten zijn die er op werken. Antwoorden:

- toch kijken naar de uiteinden;
- iets dat strak staat, klinkt met een heldere toon;
- het stuk doorsnijden en kijken wat er gebeurt;
- het stuk proberen te vervormen.

Wil men dit nader onderzoeken, dan moet er een verandering in de belasting optreden, die gepaard gaat met een vormverandering. Rijdt bijvoorbeeld een auto over een brug, dan zakt deze iets door. Het is zelfs zo, dat als een brug beter meegeeft (slank gebouwd is), deze langer meegaat. Bruggen zakken centimeters door en hoge, slanke flatgebouwen gaan centimeters heen en weer bij een flinke wind. De sterkteberekeningen in de constructiefase zijn gebaseerd op (toelaatbare) vervormingen en gebeuren grotendeels met empirische formules.



De relatie tussen vormverandering en kracht kan aan de hand van de doorbuiging van een verende stalen draad (dikte ca 3 mm) gemeten worden. Begin met een zekere voorspanning en meet vervolgens de doorbuigingstoename per 100 gf toename van de

last. Haal de gewichtjes er ook een voor een weer af en meet de afname van de doorbuiging. Zet de meetresultaten uit in een (F,s)-grafiek.

Technische toepassingen van de evenredige relatie tussen vormverandering en kracht zijn:

- de veerunster;
- de momentensleutel: hiermee kan een bout met een bepaald moment vastgezet worden, bijv. de kopbouten waarmee de kop met de kleppen op een cilinder gezet kan worden (circa 6 kgfm);
- rekstrookjes: toegepast op wisselend belaste constructiedelen, zoals bij bruggen, maar ook op roterende assen. Op een plakband wordt een dunne draad aangebracht. Door oprekking wordt de draad langer en zal de elektrische weerstand toenemen. Deze toename is een maat voor de kracht. Bij roterende meetopstellingen wordt de meetwaarde met behulp van een zender geregistreerd.

De onzichtbare krachtenstructuur en de zichtbare vormverandering zijn twee aspecten van een geheel, zoals bij de mens die zijn spieren spant de innerlijke wil en de uiterlijke vorm ook twee aspecten van een geheel vormen.

Kracht en vervorming zijn maar tot een bepaalde waarde evenredig. Na de elasticiteitsgrens treedt blijvende vervorming op. De evenredigheidsconstante is een maat voor de elasticiteit van een stof. Deze elasticiteitsmodulus wordt berekend door de spanning σ (kracht per cm^2) te delen door de relatieve vormverandering $(\Delta l/l)$:

$$E = \frac{\sigma}{\Delta l/l}$$

Ofwel: de lengteverhouding $\Delta l/l$ komt overeen met de verhouding van de spanning tot de elasticiteitsmodulus σ/E. Beide verhoudingen zijn dimensieloos (E heeft de dimensie van spanning). Dit betekent dat de lengte verdubbelt wanneer σ gelijk is aan E.

De lengtevermeerdering gaat over het algemeen niet gepaard met een evenredige diktevermindering, zoals men in eerste instantie zou verwachten. De diktevermindering wordt uitgedrukt in het poissongetal μ. Voor een diktevermindering in verhouding met de lengtevermeerdering moet het poissongetal ongeveer 0,5 zijn. Enkele waarden voor E en μ zijn:

	E (in 10^5 kgf/cm^2)	μ (in kgf/cm^2)
ijzer	22	0,29
koper	12	0,35
aluminium	7	0,34
glas	7	0,25

(glas is vrij elastisch, maar ook bros: net als ijs breekt het snel)

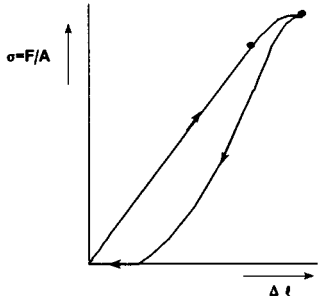
tin	5,5	0,33
beton	3	
lood	1,5	0,45
ijs	4,105	

Uit de tabel zien we dat de diktevermindering altijd kleiner is dan 0,5 en afhankelijk van het materiaal. Vergelijken we de drie metalen:

lood	1,5	0,45
tin	5,5	0,33
ijzer	22	0,29

dan zien we dat het lood weliswaar gemakkelijk oprekt, maar dat haast al het materiaal voor verlenging uit de dikte komt. IJzer rekt meer dan tien keer minder op bij dezelfde spanning, maar de oprekking gaat nauwelijks gepaard met diktevermindering. We zouden kunnen zeggen dat lood uitwendig elastisch is: alles komt uit de lengte of de breedte, terwijl ijzer meer inwendig elastisch is. In karaktertrekken uitgedrukt zou men kunnen zeggen: het lood is meegaand pragmatisch, terwijl het ijzer echt innerlijk betrokken is en zeer standvastig.

Een tweede bijzonderheid is dat een materiaal dat elastisch vervormd is tijdsafhankelijk terugveert. Vervormt men een materiaal snel en niet te ver, dan veert het gemakkelijk terug. Vervormt men echter een materiaal langdurig en in de buurt van de elasticiteitsgrens, dan veert het als volgt terug (zie figuur).



Dit is ook herkenbaar als psychologisch proces. Heeft men gedurende lange tijd een grote inspanning geleverd, dan vraagt het herstelproces tijd: "de tijd heelt wonden". Het terugveren van het materiaal kan uren of dagen duren, afhankelijk van hoe lang het onder spanning heeft gestaan.

Een derde bijzonderheid is dat de volume-elasticiteit bij toenemende druk groter wordt en bij toenemende temperatuur afneemt. Dit is geheel volgens de wetmatigheid van proces en tegenproces (zie deel I, paragraaf 4.6 en 4.9.4). De toenemende volume-elasticiteit is het verzet tegen de volumevermindering door de druk. Het fenomeen van proces en tegenproces betekent dat natuurprocessen er steeds naar streven om de evenwichtstoestand die er is te handhaven. Stijgt de temperatuur, waardoor uitzetting

plaatsvindt, dan zal de stof zich gemakkelijker laten samendrukken. Neemt de druk toe, dan zal de stof zich steeds meer verzetten tegen verdergaande samendrukking. De verhouding van druk σ en volume-elasticiteit M kan als een dimensieloze grootheid worden vastgelegd:

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\sigma}{M} \quad (1/M \text{ wordt de compressibiliteit genoemd})$$

Enige waarden van de volume-elasticiteit M bij 180°C:

	M (in 10^5 kgf/cm^2)	
ijzer	17	
lood	7,4	
tin	5,8	
kwik	2,6	
water	2	(bij 100 bar 22×10^3 en bij 200°C 12×10^3)
olijfolie	16	
alcohol	9	

3.4 Achtergronden en ideeënvorming

3.4.1 Open en gesloten systemen

Een statisch evenwicht van krachten vormt een gesloten systeem. Om het karakter hiervan duidelijk te typeren vergelijken we dit gesloten krachtencomplex met het fenomeen van beweging zonder kracht.

Beweging

Een beweging zonder kracht komt het duidelijkst tot verschijning in het planetenstelsel. (Vergelijk paragraaf 2.7.4) Ook de vrije val is als zo'n beweging te beschouwen. De weerstandsloze vrije val is immers onafhankelijk van grootte, vorm en aard van de stof en ontstaat niet door een gravitatiekracht, maar door de gravitatieversnelling.

Statische krachten

Een krachtencomplex zonder beweging is te vinden in elke balkconstructie die op de aarde rust.

Een vrije beweging oriënteert zich niet op zijn omgeving, wordt niet door de omgeving gestoord, maar bestaat voor zichzelf, is helemaal aan zichzelf overgeleverd. Hij is georiënteerd op een punt in het oneindige of op een centrum. Een beweging vindt zijn oriëntatie in de richting die hij als bewegingsorganisme heeft.

Een statische constructie met de daarop werkende krachten vormt steeds een gesloten geheel, dat in zichzelf stabiel is. Een krachtencomplex is niet georiënteerd op een richting, maar is sferisch, alzijdig. Het is ingebed in zijn omgeving. Het vormt zelf een krachtenruimte in de ruimte.

In deel I, paragraaf 4.9 werd een inleiding gegeven op de projectieve meetkunde en de toepassing ervan binnen de fenomenologische natuurkunde. Hierbij kwam ook het begrip grensvlak ter sprake. Dit is een oneindig ver, in alle richtingen gelegen, alzijdig en volkomen plat vlak. In het onderstaande wordt onderzocht welke relatie er bestaat tussen dit oneindig verre vlak en het fenomeen beweging zonder kracht tegenover het statische krachtencomplex.

Een beweging zonder kracht is georiënteerd op een oneindig ver gelegen punt of centrum. Van het grensvlak, dat alle mogelijke richtingen vertegenwoordigt, is één richting geactualiseerd. De beweging is zelf steeds middelpunt ten opzichte van de oneindigheid.

Het statische krachtencomplex is ingebed in de omgeving. Van het grensvlak is het sferische, alzijdige karakter geactualiseerd, wat tot uitdrukking komt in het ruimtelijke en gesloten karakter.

Alleen vrije beweging zonder kracht en statische krachtensystemen die ideaaltypisch worden opgevat vormen in zichzelf gesloten systemen. In de werkelijkheid werkt er altijd een invloed uit de omgeving, waardoor deze systemen een ruimtelijk open karakter krijgen. Ieder bewegend object is ingebed in een omgeving die remmend, weerstand biedend op de beweging inwerkt. Op elke constructie werkt de omgeving, werken de elementen van weer en wind e.d. zodanig in, dat hij belast wordt en verzwakt door oxidatie, verwering en vermoeiing.

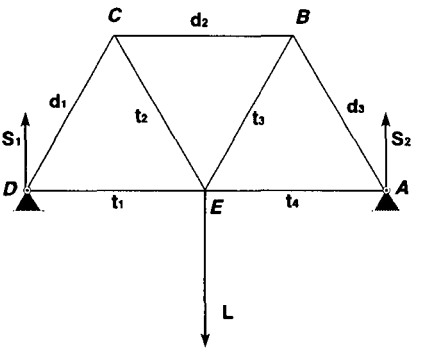
Is een statisch krachtensysteem niet gesloten, dan ontstaat oriëntatie in de ruimte. Een voorwerp waarop de kracht inwerkt komt dan in beweging. De relatie tussen het bewegingsverloop en de versnellingskracht moet experimenteel gevonden worden. Dus:

- Een *gesloten* krachtensysteem wordt gekenmerkt door *vormvastheid*. De vaste stoffen tenderen via geringe vormverandering naar een blijvende vorm, vloeistoffen en gassen vertonen tijdelijke vormen, zoals wervels en golven.
- Bij een *open* krachtensysteem ontstaat altijd een *oriëntatie in één richting*. In plaats van vorm ontstaat beweging.

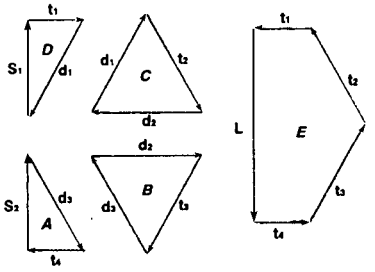
3.4.2 De vakwerkbrug als toepassing van een gesloten krachtensysteem

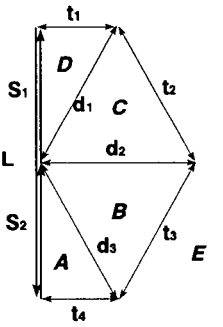
In een bouwwerk van staven (en eventueel ook van touwen) kunnen we de krachten gemakkelijk construeren. Er zijn in een bouwwerk, waarin de staven alleen aan de uiteinden aan elkaar vastgemaakt zijn, eigenlijk maar twee soorten krachten mogelijk, namelijk *trek*krachten en *druk*krachten.

Een symmetrische situatie



Op een zeer eenvoudige brug, bestaande uit een vakwerk van drie gelijkzijdige driehoeken, staat een auto precies op het middelste knooppunt. In deze situatie worden de staven alleen op trek of op druk belast. Als de auto verder rijdt dan worden de liggers DE en EA ook op buigkrachten belast. Het eerste wat we na kunnen gaan is de soort kracht die in de staven werkt. In de drie staven AB, BC en CD werkt drukkracht. De andere vier staven worden in deze situatie zuiver op trek belast en kunnen nu dus ook door touwen (kabels) vervangen worden. In de figuur is de last aangegeven met de pijl L aangrijpend in E; de twee even grote steunkrachten S_1 en S_2, ieder gelijk aan $\frac{1}{2}L$, grijpen aan in A en D. Als je nu in elk van de knooppunten A, B, C, D en E de krachten tekent in een krachtenveelhoek, dan weet je uit het feit dat er in elk van de knooppunten evenwicht is dat deze krachtenveelhoeken gesloten figuren moeten zijn.

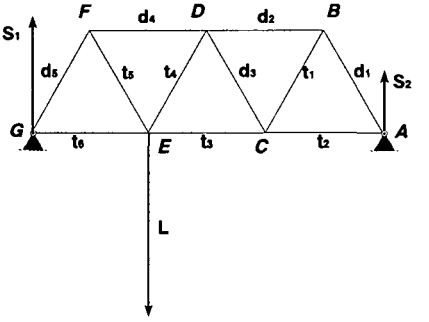




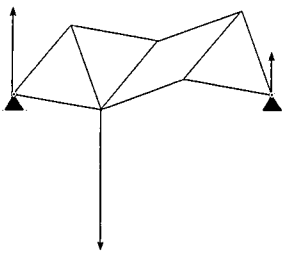
Gegeven de grootte van de steunkracht S_2 en de richtingen van de krachten in de staven bij knooppunt A kan de driehoek van krachten in A gemakkelijk getekend worden. Uit déze figuur halen we dan genoeg informatie voor de krachtenveelhoek bij knooppunt B. Op dezelfde manier kan dat voor de knooppunten C en D. In het knooppunt E komen vier staven bijeen en de krachtenveelhoek is hier een vijfhoek. We hebben nu vier driehoeken waarin de richting van de krachten met de klok mee is gericht een één vijfhoek waarin deze tegen de klok in gericht is. Van alle optredende krachten kunnen we nu uit de figuren aflezen hoe groot ze zijn. De veelhoeken zijn ook op een geheel andere manier te tekenen als gesloten figuren, maar het is duidelijk aan de tekeningen dat déze manier van weergeven ons de mogelijkheid geeft om het geheel op een handige wijze samen te vatten in één figuur. In deze figuur, die het "cremonaplan" wordt genoemd, is goed te zien dat de last L door de steunkrachten S_1 en S_2 wordt gecompenseerd. Verder is goed te zien dat elke kracht in de staven tweemaal voor komt, precies zoals een trekstaaf ook in twee knooppunten zijn trek uitoefent. Bij het cremonaplan komt duidelijk de geslotenheid van het statische krachtensysteem tot uiting.

Een asymmetrische situatie

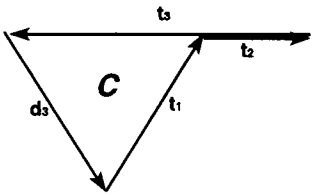
Op analoge wijze kunnen we de krachten in een vakwerkbrug door een constructie bepalen als de brug niet symmetrisch belast wordt. Zie figuur. In deze situatie zijn weer alle staven aan de onderrand op trek en aan de bovenrand op druk belast; van de binnenstaven is er één (CD) die ook op druk belast is. Dat kunnen we goed zien

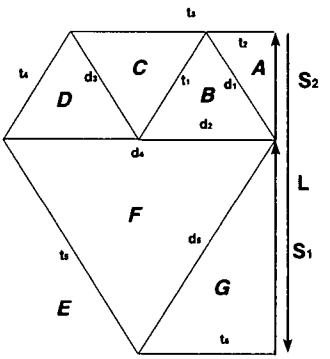


door juist deze staaf weg te laten en na te gaan hoe de brug dan zou instorten: de ruimte waarin de staaf CD zat zou dan kleiner worden, dus moet deze staaf op druk belast zijn.



De situatie is iets ingewikkelder en om toch een mooi cremonaplan te kunnen maken bedenken we dat de krachten in een krachtenveelhoek ook langs elkaar kunnen vallen. Zie bijvoorbeeld de krachtenveelhoek van punt C. Op deze wijze past die precies tegen de veelhoeken van A en B.



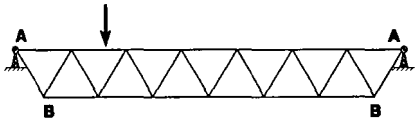


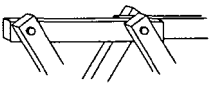
In het cremonaplan zijn weer alle krachten naar grootte en richting terug te vinden. Hier zijn nu voor de duidelijkheid niet steeds twee pijlen tegen elkaar in getekend, maar is met een lijntje volstaan. De krachtenvijfhoek van punt E vormt weer de buitenste rand van het plan. In het vakwerk komen steeds een aantal krachten bij elkaar in een knooppunt. Dit knooppunt is terug te vinden in het cremonaplan als een vlakje waaromheen de krachten staan. Omgekeerd vinden we alle vakken van de brug in het cremonaplan terug als punten. Er is hier dus sprake van een soort polaire relatie tussen het vakwerk en het cremonaplan.

Een zelf te maken model

Een model van een vakwerkbrug kan eenvoudig gemaakt worden. Het kan zo niet ín de les dan vast en zeker door enkele enthousiaste leerlingen nà de lessen aan de hand van een bouwhandleiding in elkaar gezet worden. We nemen 26 latjes van 40 × 20 mm en 40 cm lang. Aan weerszijden worden gaten (8 mm) geboord zo, dat deze gaten 34 cm uit elkaar zitten.

Met 15 bouten M8×100, moeren en ringen maken we een rij van 13 driehoeken.





Bij elk van de hoekpunten B hebben we nog één vulklosje nodig en bij de hoekpunten A nog twee. De brug kan daarna met lijmklemmen aan de rand van een tafel geklemd worden. Hij is nu goed beloopbaar, maar het is wel aan te raden de proefpersoon een hand te geven, want de brug is niet bestand tegen zijdelingse krachten, zoals wiebelen. Met enige zorg en durf kan zelfs de leraar erover lopen! Door de ruimte in de gaten zakt de brug een beetje door, maar niet echt veel.

3.4.3 Kracht, vormverandering, krachtenveld

Het begrip kracht vormt een van de moeilijkste vraagstukken in de natuurkunde. Hoe is het bijvoorbeeld mogelijk dat aan een touw getrokken kan worden zonder dat het breekt? Alleen vaste dingen kunnen in elkaar gedrukt of uit elkaar getrokken worden, zonder dat de samenhang verloren gaat of ritmische bewegingen optreden, zoals in lucht of water. Een karakteristieke eigenschap van vaste stoffen is hun inwendige hechtheid. De aard van deze hechtheid is vooralsnog een raadsel. Vloeistoffen vertonen in hun oppervlaktespanning en dunste filmdikte ook een hechtheidsfenomeen, dat aan de grenzen werkzaam is en door het oppervlak bepaald wordt. Gassen vertonen aan hun grensvlakken eveneens nog iets van hechtheid, zoals tot uitdrukking komt in de lichtbreking aan luchtlagen.

Welke begrippen kunnen ontwikkeld worden om het raadsel hechtheid van een stof op een andere wijze te benaderen dan met de begrippen adhesie en cohesie? Aan de hand van een praktisch voorbeeld zullen een aantal fenomenen besproken worden die hiertoe op weg kunnen helpen.

Wanneer een stalen haak belast wordt, dan werkt er van buiten af een kracht op de haak in, waardoor deze in lichte mate vervormt. In de haak ontstaat een krachtenstruktuur die bepaald wordt door vorm, afmetingen en materiaaleigenschappen. Zolang de haak elastisch vervormt treden er geen bijzondere wijzigingen op. Een moeilijk te begrijpen verschijnsel vormt echter de metaalmoeheid. Soms begeeft een materiaal het opeens. Dit gaat meestal gepaard met haarscheurtjes in het materiaal. Aan dit voorbeeld laten zich de volgende gedachten ontwikkelen.

Het voorwerp en het krachtenveld kunnen denkend onderscheiden worden als twee zelfstandige entiteiten, die door de vormverandering met elkaar samenhangen. Het voorwerp is zintuiglijk waarneembaar en het krachtenveld is door het fenomeen van de vervorming denkend waarneembaar. Wat is nu de oorsprong van de kracht, die tot uitdrukking komt in de weerstand van het voorwerp tegen vormverandering? In plaats van aan te nemen dat deze kracht veroorzaakt wordt door een atomaire stoffelijke structuur, moeten we vaststellen dat voor deze weerstand biedende kracht geen ruimtelijke oorzaak gevonden wordt. We kunnen hier aansluiting zoeken bij de denkwijze van Aristoteles, die drie niet zintuiglijke entiteiten onderscheidt, die in hun samenwerking of samenhang ten grondslag liggen aan de zintuiglijke wereld: materie, ruimte, en kwaliteiten.

Aristoteles zag de "materia prima" als een onruimtelijke entiteit, een beginsel dat zich laat verbinden met kwaliteiten, zodat de "materia signata", de materie met eigenschappen, in de ruimte tot verschijning kan komen. Een dergelijke onruimtelijke entiteit, die een werkzaamheid in het ruimtelijke kan uitoefenen, noemen we sfeer. Zo willen we de oorsprong van de weerstand biedende kracht, die zich uitdrukt in de vormverandering van een vaste stof, een krachtensfeer noemen. Hieraan wordt de polaire structuur van de ruimte zichtbaar: voorwerp en krachtensfeer staan polair maar intrinsiek met elkaar verbonden tegenover elkaar. Het vervormde voorwerp behoort tot de zintuiglijke wereld en het krachtenveld, de krachtenstructuur tot het innerlijk van de wereld. Beide zijn inherent in samenhang met elkaar.

Het aristotelische onderscheid tussen "potentie" en "act" sluit hier ook volledig bij aan. Met vaste stoffen is in potentie een krachtensfeer verbonden die zich actualiseert wanneer een uitwendige kracht op een voorwerp werkt. De krachtensfeer trekt als het ware naar binnen, de vormverandering en alle andere stofveranderingen zijn de zintuiglijke uitdrukking van dit proces. Uit deze gedachtengang mag blijken dat het noodzakelijk is om tot een uitbreiding te komen van het gangbare ruimtebegrip. Van de eenzijdige opvatting van de ruimte als puntruimte, waarbij slechts punten centra van krachten kunnen zijn, moeten we komen tot een polaire dynamische ruimte, waarbij de polariteiten, zoals die van het ding tegenover de ermee verbonden krachtensfeer, overal in de ruimte werkzaam kunnen zijn. Als voorbeelden van zulke polariteiten kunnen beschouwd worden:

ding	*krachtensfeer*
punt	lijn, vlak
naast elkaar	in elkaar
op één plaats	overal
ding op zichzelf	relaties
contour, begrenzing	onbegrensd

De ruimtepolariteit wordt in tegenstellingen als klein-groot, weinig-veel of compact-ijl in feite nog te statisch weergegeven. Hij moet dynamisch gedacht worden: het sferische heeft geen ruimtelijke plaats, maar kan zich overal, als een samenhang tussen de dingen, actualiseren. Overal zijn oneindigheid en puntachtigheid als tendensen werkzaam. Wanneer men bijvoorbeeld alleen de wet van Hooke (vormverandering evenredig met kracht) in ogenschouw neemt en niet de stap wil maken naar de idee die eraan ten grondslag ligt, dan is dat te vergelijken met het beschrijven van iemand die boos is door op te merken dat hij rood en gespannen wordt en het uitbrult, zonder dat men oog heeft voor de (onzichtbare) aanleiding, die eigenlijk primair is maar alleen voelend en denkend te vatten is.

Ieder voorwerp dat door uitwendige krachten belast wordt heeft een heel bepaalde krachten- en vervormingsstructuur. Werken er krachten op een constructie, dan hangt het van de grootte van de krachten én van de constructie af hoe deze structuur eruit komt te zien. Afhankelijk van het feit of een rechthoek ABCD een metalen plaat is, een houten plank met een bepaalde nerf, een pijpen-constructie of bestaat uit twee staven AC en BD en een omtrek van touw, zal een bepaalde vervormingsstructuur optreden. Op grond van het voorgaande kunnen we de samenhang als volgt in beeld brengen:

krachten-/eigenschappensfeer

↑ uitwendige belasting geeft
↓ een krachtenveld/structuur

ding

Het gestructureerde krachtenveld mag niet statisch opgevat worden, daar het nog een bepaalde tendens heeft. Zo geldt voor alle metalen dat ze sterker worden door blijvende (onelastische) vervorming. Een staaf die op trek belast wordt, zal na de elasticiteitsgrens blijvend oprekken en dunner worden, maar toch moet de kracht vergroot worden om de verlenging/verdunning nog te laten toenemen. Het materiaal wordt sterker tot aan het breekpunt toe. Per oppervlak wordt de kracht die weerstaan kan worden steeds groter. In het krachtenveld spreekt zich dus een tendens uit tot intensivering. Naarmate de belasting groter wordt, zal de krachtensfeer zich sterker actualiseren, totdat het materiaal met een knal breekt. Dit is weer een voorbeeld van proces en tegenproces. Op deze wijze zijn er vier aspecten te onderscheiden:

- het ruimtelijke ding;
- verbonden met het ding is een krachtensfeer;
- bij belasting ontstaat een krachtenveld met een bepaalde structuur;
- dit krachtenveld heeft de tendens om zich te versterken.

3.4.4 De meervoudige aard van het krachtbegrip

In de ontwikkeling van de natuurwetenschap heeft de krachtenleer een dubbel leven geleid. Aan de ene kant beleefde de mens de natuur als doordrongen van krachten en zocht hij de oorsprong daarvan, de oerkrachten, te doorgronden. Aan de andere kant ondervond hij in de arbeid die hij verrichtte zijn eigen spierkracht, die hij bij tillen, trekken, duwen, splijten etc. van voorwerpen moest inzetten om verplaatsingen en vervormingen teweeg te brengen. Men zou kunnen zeggen: in het gebied van de krachten waren verschillende sferen te onderscheiden, een meer innerlijke sfeer die met het levende in de natuur samenhangt, en een meer uiterlijke sfeer die zich manifesteert in de ervaarbare verschijnselen van de mechanica.

Het griekse denken culmineerde op dit gebied in de leer van de vier elementenkrachten: vuur, lucht, water en aarde werden gezien als oerprincipes waarop de ordening van de wereld is gebouwd en die, in wisselende verhoudingen, aan elke verschijningsvorm ten grondslag liggen. Deze vier elementen staan volgens Aristoteles in het spanningsveld van centrifugale en centripetale krachten en zijn bovendien verbonden met de polariteiten warm-koud en vochtig-droog, waardoor hun verschillende werkingen te begrijpen zijn. De uiterlijke mechanische verschijnselen waren in deze visie ingebed.

Na de griekse cultuur volgde in de Middeleeuwen een periode van inkeer en verchristelijking, die met een verzelfstandiging van de menselijke ziel gepaard ging. Een nieuwe visie op de constituerende oerkrachten kwam op. Als Paracelsus (1493-1541) zijn onderzoekende geest op de mens en de natuur richt, spreekt hij niet meer van de vier elementen: hij breekt volledig met deze opvatting en verscheurt zelfs de oude boeken. Paracelsus zocht een hogere natuur achter de uiterlijk zichtbare en vond die in de drie principes van sal, mercuur en sulphur, de tria prima. Sal, het structuurvormende principe zoals dat bijvoorbeeld in het kristalliseren tot uitdrukking komt, verbond hij met het denken. We spreken dan ook van een kristalheldere gedachte. Sulphur, het veranderlijke, vernieuwende principe, zag hij in overeenstemming met de wil. Zo kent het element zwavel vele vormen, amorf en kristallijn, waarin het in de natuur voorkomt. Mercuur tenslotte, het verbindend-beweeglijke principe, zag hij in samenhang met het menselijke gevoel, dat ook in de ziel de verbindende schakel vormt tussen denken en doen. Kwik, of kwikzilver zoals het vroeger werd genoemd, rolt overal heen en heeft zo'n speelse manier van bewegen, dat het spreekwoordelijk is geworden. Dit idee van de tria prima werd de basis van de alchemie en daarmee tevens van het krachtenspel tussen de aardse substanties.

Met de Renaissance gaat dit aspect van de krachtenleer een sluimerend bestaan leiden. De door Galileï (1564-1642) ingezette experimentele aanpak van de natuurverschijnselen leidt tot een helder wiskundig te

beschrijven mechanica, die door het werk van Newton (1642-1727) en vele anderen een enorme impuls krijgt. De mechanica wordt in de loop van de volgende eeuwen tot de basis van de fysica: het streven is erop gericht alle natuurverschijnselen in de zin van de uiterlijke mechanische krachten te verklaren en te beschrijven. De grondslag wordt gezocht in elementaire atomaire deeltjes, protonen, neutronen, elektronen; als oerkrachten worden zwaartekracht, elektriciteit, magnetisme en de kernkrachten beschouwd. Zelfs het licht als meest immaterieel natuurverschijnsel blijkt zich in bepaalde opzichten in deze beschouwingswijze te laten vangen: de fotonen vormen de elementaire deeltjes van de kwantenmechanica.

Hoe dieper echter de mechanische beschouwingswijze in de natuurverschijnselen doordringt, des te verder verwijdert zich het krachtsbegrip van de direct ervaarbare spierkrachtinspanning. De voorstelling van de materie als 'samengeklonterde' deeltjes is al lang prijsgegeven en naarmate het onderzoek zich verdiepte werd het beeld van de materie steeds 'ijler' en de wisselwerking tussen de deeltjes meer 'op afstand'. Ook in de elektromagnetische veldtheorieën moest die werking op afstand worden geïntroduceerd, aanvankelijk nog gedacht door bemiddeling van een middenstof, maar uiteindelijk teruggebracht tot een beïnvloeding van de ruimtestructuur als zodanig. Krachten in de fysica zijn dus in feite, buiten het gebied van de directe mechanische overbrengingen, tot 'werkingen' geworden, waarvan de grondslag niet met uiterlijke middelen waarneembaar is. Daarmee staat de natuurwetenschap aan een drempel. De noodzaak lijkt zich voor te doen een nieuwe visie op het begrip kracht te ontwikkelen, zodanig dat tussen 'innerlijke' en 'uiterlijke' krachten een verband kan worden gelegd. Zo'n visie, die als opgave voor de komende eeuw kan worden beschouwd, kan voor de technische toepassingen die uit de natuurwetenschap voortvloeien belangrijke gevolgen hebben.

3.4.5 Techniek in relatie tot de mens

Techniek is in oorsprong antropomorf van aard: vele gereedschappen zijn van menselijke organen afgeleid.

gereedschap	*mens*
zaag, mes, vijl, rasp	tanden, nagels
hamer/lepel	vuist/hand
bankschroef, klem	knijpen
hefboom	arm, been, skelet/spieren
boor	vingers
wiel, rad	lopen

Later zijn naast gereedschappen machines ontstaan, die samengestelder zijn en veel meer functies in zich verenigen. De machines kan men globaal in drie groepen verdelen, geordend naar primaire functie:

- besturing (hoofd): - rekenliniaal, telraam, rekenmachine, computer
- bemiddeling (romp): - katrol, bel, trein, radio, t.v., telefoon, fax, modem
- kracht (ledematen): - zeilboot, windmolen, verbrandings-, elektromotor

Machines zijn gerealiseerde gedachten. Aan de huidige machines ligt het gesloten-systeem-denken ten grondslag: men gaat uit van een gesloten ruimte - een black box - waar zich een in de tijd lineair proces afspeelt. De leidende gedachte daarbij is de omzetting van energie. Hoe zou een techniek eruit zien, ontwikkeld vanuit gedachten die uitgaan van open systemen, waartoe o.a. Keely en later Steiner met de zogenoemde stradermachine een poging hebben gedaan? Zo'n techniek zou zijn voorbeelden hebben in het leven. Alle levende wezens zijn open systemen. In een open systeem stroomt iets binnen dat in de voorwaarden niet is vastgelegd, zoals bijvoorbeeld de vorm van een plant of dier die niet uit de chemische of energetische randvoorwaarden is af te leiden. Het leven is echter voor de natuurwetenschap nog steeds een groot raadsel dat om die reden door sommigen zelfs als niet existent wordt beschouwd.

Een andere eenzijdigheid van de huidige techniek is de dominantie van rechte en rondgaande bewegingen. Een techniek die gebruik maakt van ritmische bewegingen zou een tegenwicht kunnen bieden. In dat verband is te wijzen op het werk van Paul Schatz*, die constructies ontwikkelde op basis van de zogenoemde polysomatische vormen (o.a. de oloïd). Toepassingen hiervan zijn gerealiseerd in de menging van stoffen en de waterzuivering; ook zijn experimenten gaande op het gebied van voortstuwing van schepen. Hiermee is een stap gezet in de richting van een techniek die niet ten koste gaat van de natuur maar in harmonie daarmee werkt.

Dit is niet alleen maar een interessant onderwerp om naar te verwijzen. De strekking gaat verder. De omgang van de mens met de aarde is in de huidige tijd een punt van serieuze bezinning. Zorg voor de aarde en betrokkenheid bij het ontwikkelen van een mens- en milieuvriendelijke techniek is als intentie bij de leraar een voorwaarde om leerlingen op dit gebied in hun wil aan te spreken.

* Paul Schatz: *Rhythmusforschung und Technik.*

3.4.6 De eenheid van kracht

In de 10e klas wordt voor het eerst in de bovenbouw de mechanica behandeld. In de onderbouw is in de 7e klas de krachtenleer al wel behandeld aan de hand van takels, hefbomen, wiggen, enz. Het is dan nog niet aan de orde om lang bij de eenheid van kracht stil te staan. De aansluiting bij het gangbare taalgebruik met de kilogram als eenheid van gewicht en kracht is op deze leeftijd vanzelfsprekend. Maar hoe is dat in de 10e klas? Ook dan ligt het voor de hand in eerste instantie aan te sluiten bij het gangbare taalgebruik en als eenheid van kracht de kgf te nemen. De toevoeging van de letter f als aanduiding voor kracht (force) is al wel een aanwijzing dat er kennelijk naast de kilogramforce (kgf) nog een andere kilogram bestaat. Bij de behandeling van de dynamica komt dan de historische ontwikkeling van het massa- en krachtbegrip ter sprake en het dilemma van de kg-kracht tegenover de kg-massa. Dat is dan het juiste moment om te laten zien waarom de natuurkundigen de eenheid van massa (samen met de eenheden van lengte, tijd en temperatuur) als basiseenheid hebben gekozen voor het samenhangende eenhedenstelsel. Dat had tot gevolg dat voor kracht een nieuwe, van de basiseenheden afgeleide eenheid moest worden gedefinieerd. Deze nieuwe eenheid van kracht is de newton (N) genoemd.

De newton is gedefinieerd als die kracht, die aan een massa van 1 kg een versnelling geeft van 1 m/s^2. Eerder was reeds het verband vastgelegd: wanneer een kracht van 1 kgf aan een voorwerp een versnelling geeft van g m/s^2, dan is de massa daarvan 1 kg. Hieruit volgt:

$$g\ \mathrm{N} = 1\ \mathrm{kgf}$$

ofwel:

$$1\ \mathrm{N} = \frac{1}{g}\ \mathrm{kgf} \approx \frac{1}{9{,}81}\ \mathrm{kgf}$$

Daar newton als eenheid van kracht in het dagelijks leven (nog) niet of nauwelijks wordt gebruikt en het hier puur om afspraken gaat, kan men ervoor kiezen in de periode de eenheid kgf te blijven gebruiken met vermelding, dat binnen de wereld van natuurkundigen en technici de eenheid newton gebruikt wordt. Bij dit gebruik is dan in vakuren aan te sluiten (zie ook paragraaf 4.3).

4. DYNAMICA

4.1 Inleiding

Bewegend met zijn lichaam ervaart de mens wat in de natuurkunde vermogen wordt genoemd. De snelheid die we bereiken en de kracht die we daarbij inzetten zijn de factoren die deel uitmaken van het vermogen; wiskundig kunnen we het vermogen omschrijven als het product kracht maal snelheid. Nemen we alleen kracht of beweging als verschijnsel op zichzelf, dan ontstaat een geïsoleerde situatie: kracht zonder beweging is uiterlijk geïsoleerd in de statische situatie van het krachtenevenwicht; beweging zonder kracht is innerlijk geïsoleerd in onze voorstelling ervan. Zoals in de inleiding al besproken werd, is de mens met het fenomeen beweging immers verbonden door zijn voorstelling en met het fenomeen kracht verbonden via zijn wil. De dynamiek die uit de samenwerking van kracht en beweging ontstaat beleven we met ons voelen. In schema:

fenomeen	*zieleactiviteit*	*begrip*	*maat*
beweging	voorstelling	snelheid	v = afstand/tijd
dynamiek	beleving	vermogen	$P = F \times v$
vormverandering	wil	kracht	$F \propto \frac{\Delta l}{l}$

Voor we nader op het begrip vermogen ingaan en op toepassingen daarvan, willen we nog een andere combinatie van grootheden bekijken, namelijk het product kracht maal tijd. Welke betekenis kunnen we toekennen aan $F \times t$? We onderzoeken deze vraag in de volgende situaties:

1. het voorwerp staat stil;
2. het voorwerp beweegt met constante snelheid;
3. de kracht komt ten volle ter beschikking voor de versnelling van het voorwerp.

Ad 1. In de eerste situatie, waarin uiterlijk niets verandert, heeft het product $F \times t$ in de huidige natuurkunde geen betekenis. Houdt men echter een tijdje een gewicht omhoog, dan ervaren we wel degelijk iets. De uitgeoefende kracht wordt beleefd aan het eigen lichaam en de tijd wordt als het uithoudingsvermogen of het vermoeidheidseffect beleefbaar. In statische situaties en constructies vertegenwoordigt $F \times t$ een energie die niet te mobiliseren is. d'Alembert sprak over virtuele energie.
Ad 2. In situatie 2, waarbij het voorwerp wel beweegt maar niet versnelt, is alle kracht nodig om de weerstand te overwinnen. $F \times t$ wil hier dus

zeggen: hoelang moet ik een kracht leveren? Dit is dus een energiemaat, die natuurkundig echter niet wordt toegepast. Natuurkundig is men gewend om de opgebrachte energie te berekenen met het product $F \times s$, waarbij s de afstand is waarover een voorwerp door de kracht F is verplaatst. Men kan $F \times t$ ook als een maat voor de hardheid van een materiaal opvatten: men drukt een punt een zekere tijd in een materiaal en kijkt hoe diep de put is.
Ad 3. In situatie 3 is de kracht volledig beschikbaar voor het versnellen van een voorwerp. Met het toenemen van de kracht of de tijd zal ook de snelheid van het voorwerp toenemen. De waarde $F \times t$ heeft nu de betekenis van een stoot, waardoor het voorwerp een snelheid krijgt, die afhankelijk is van zijn massa.

Men ziet dat er een groot verschil kan zijn in betekenis van een formule als deze in statische of dynamische situaties wordt toegepast.

4.2 Toepassingen van vermogen

Zoals hiervoor al ter sprake kwam is het vermogen een begrip in de dynamica dat direct aan de ervaring gerelateerd kan worden. Mijn vermogen is groter naarmate ik meer kracht kan leveren en deze effectief kan aanwenden tot vermeerdering van de snelheid van een voorwerp. De wiskundige uitdrukking van deze ervaring is de formule $P = F \times v$. Om deze ervaringen kwantificeerbaar te maken moeten dus de beide aspecten van kracht en snelheid gemeten worden. Een geschikte proef hiervoor is het bestijgen van een lange trap met een zo hoog mogelijke snelheid. Gemeten worden: 1) gewicht van de persoon, 2) traphoogte, 3) tijd. Een experiment uitgevoerd door leerlingen op een brandtrap van 10 m hoogte leverde de volgende resultaten:

gewicht (kgf)	tijd (s)	snelheid (m/s)	vermogen = $F \times v$ (kgf·m/s)	(pk)
48	8,3	10/8,3 = 1,2	48×1,2 = 58	58/75 = 0,77
52	10,5	10/10,5 = 0,96	52×0,96 = 50	50/75 = 0,66
65	8,3	10/8,3 = 1,2	65×1,2 = 78	78/75 = 1,05
56	7,7	10/7,7 = 1,3	56×1,3 = 73	73/75 = 0,97

Een tweede voorbeeld. Een mens kan kortstondig ongeveer 1 pk = 75 kgf.m/s leveren. Zie de derde leerling in het vorige voorbeeld. Wil men het langer volhouden, dan moet men zijn krachten sparen. Wanneer men bijvoorbeeld fietst op een fiets met versnellingen, dan zoekt men naar de gunstigste verhouding tussen kracht en snelheid waarmee de pedalen

rondgaan. De ene mens levert liever veel kracht bij weinig snelheid, de ander juist het omgekeerde. Stel een fietser duwt met een kracht van 25 kgf op de pedalen, die met een snelheid van 1,25 m/s rondgaan, terwijl de trappers eenmaal rondgaan per seconde. De kracht werkt ongeveer gedurende de helft van de omwenteling. We berekenen als volgt het vermogen:

$$P = F \times v \times \tfrac{1}{2} = 25 \times 1{,}25 \times \tfrac{1}{2} = 15{,}6 \text{ kgf·m/s} = 0{,}2 \text{ pk}$$

De met dit vermogen bereikte snelheid is, bij een tandwielverhouding van 15/52 en een wieldiameter van 26" ≈ 70 cm:

$$v = \frac{\pi D \cdot n}{t} = \frac{3{,}14 \times 0{,}7 \times 52/15}{1} = 7{,}6 \text{ m/s} = 27 \text{ km/h}$$

Voorbeeld 3. Een automotor levert een maximaal vermogen van 50 pk op de aandrijfas en rijdt dan met een constante snelheid van 140 km/h = 38,8 m/s. De stuwkracht van de wielen op de weg en dus ook de tegenwerkende windkracht is:

$$P = F \times v \rightarrow F = \frac{P}{v} = \frac{50 \times 75}{38{,}8} = 96{,}5 \text{ kgf}$$

4.3 Massa

Stel men duwt met gelijke kracht en gedurende dezelfde tijd een fiets, een brommer, een auto en een personenbusje vooruit, dan zal de eindsnelheid van de verschillende vervoermiddelen kleiner zijn naarmate de massa groter is. Om dit nader te onderzoeken kan men verschillende proefopstellingen bedenken. Bijvoorbeeld kan men een schuitje op een luchtkussenbaan nagenoeg wrijvingsloos versnellen. Ook kan men het toestel van Atwood gebruiken, waarbij de valbeweging zodanig wordt vertraagd dat het mogelijk is om met stopwatches de tijdwaarneming te doen. Nog een andere mogelijkheid is een fiets te versnellen, waarbij men de wrijving zo goed mogelijk compenseert door een enigszins aflopende weg te nemen. Dit kan men uitproberen door na te gaan of de fiets met berijder na een zet gekregen te hebben constant uitrijdt.

De laatste proef wordt hier uitgewerkt. Vanuit stilstand wordt de fiets met een kracht van 12 kgf versneld over een afstand van 10 m. Het constant houden van de kracht is lastig en vraagt om enige oefening. Een bruikbare manier is om een doorgeknipte fietsband aan de fiets te bevestigen en die

met het andere uiteinde door een pijpstuk te steken en vast te maken. Bij het trekken rekt de band op; komt een geijkte merkstreep uit de pijp, dan is de gewenste kracht bereikt. De fiets wordt zowel door één persoon als door twee personen bereden. In het eerste geval blijkt er 2,9 seconden nodig om de 10 meter af te leggen, in het tweede geval 4 seconden.

De berekening verloopt nu als volgt. In beide gevallen krijgt de fiets een bewegingsimpuls (stoot) door een kracht van 12 kgf die gedurende 2,9 resp. 4 s werkt, dus:

bij 1 persoon — *bij 2 personen*

$P = F \times t = 12 \times 2{,}9 = 34{,}8$ kgf·s $\quad P = F \times t = 12 \times 4 = 48$ kgf·s

Door de stoot krijgt de fiets een snelheid v die voldoet aan de formule voor een eenparig versnelde beweging:

$s = v_{gem} \cdot t = \frac{1}{2} v_{eind} \cdot t \rightarrow \quad v_{eind} = 2s/t$

dus:

$v_{eind} = 2 \times 10/2{,}9 = 6{,}9$ m/s $\qquad v_{eind} = 2 \times 10/4 = 5$ m/s

De verhouding van $F \times t$ en v drukt uit hoe moeilijk of makkelijk de fiets met berijder(s) in beweging komt: de standvastigheid zich tegen verandering te verzetten wordt met deze verhouding uitgedrukt. We vinden voor de twee onderzochte gevallen:

$F \times t/v = 34{,}8/6{,}9 = 5$ kgf·s²/m $\qquad F \times t/v = 48/5 = 9{,}6$ kgf·s²/m

Wegen we de fiets met zijn berijder(s), dan weegt de fiets met 1 persoon ruim 50 kgf en die met 2 personen 100 kgf. We zien dat de gewichtsverhouding ongeveer gelijk is aan de standvastigheidsverhouding. Verder zien we dat het gewicht ongeveer 10 maal zo groot is als de standvastigheid, om precies te zijn 9,8 maal zo groot, exact gelijk aan de valversnelling g.

Op zeker moment heeft men de verhoudingsformule aangepast aan de aardse situatie en er voor gezorgd dat de standvastigheid dezelfde getalsgrootte kreeg als het gewicht:

$9{,}8 \times F \times t/v =$ de standvastigheid in kgf·s²/m

Een volgende stap was om de standvastigheid massa te noemen, waarbij snel aan de hoeveelheid stof wordt gedacht. Deze massa kreeg nu de eenheid kgmassa, ofwel: 1 kgf·s²/m = 1 kgm. In de jaren '60 van deze eeuw vond men de onduidelijkheden te groot en heeft men voor een oppervlakkig gezien duidelijke oplossing gezorgd. Men koos als eenheid van kracht de newton:

1 kgf = 9,8 N. De eenheid van massa werd gewoon de kilogram, zodat nu geldt: 1 $N \cdot s^2/m$ = 1 kg.

De kilogram als maat voor de massa resp. standvastigheid is iets heel anders dan de kilogram als maat voor het gewicht. Gewicht is direct beleefbaar, de standvastigheid niet, het is een puur begrip - en daarmee niet minder reëel - dat betekenis heeft wanneer voorwerpen vertraagd of versneld worden door krachten. Had men in de jaren '60 massa een nieuwe naam gegeven en gewicht, evenals kracht de kilogram gelaten, dan had men veel onbegrip vermeden. Wanneer iemand 50 kg cement koopt, dan drukt men zich natuurkundig juist uit, maar niemand is op dat moment geïnteresseerd in de standvastigheid of traagheid van deze cement.

Er zijn nu drie mogelijkheden om verder te gaan:

1. $F \times t/v$ = massa
   De kracht in kgf en de massa in kgm, zodat op aarde de massa 1/10 deel is van het gewicht.
2. $10F \times t/v$ = massa; F in kgf en m in kgm
   Nu is de getalswaarde van de massa gelijk aan die van het gewicht. Kwantitatief zijn ze gelijk, kwalitatief natuurlijk niet.
3. $F \times t/v$ = massa; F in N en m in kg
   waarbij de massa kwantitatief weer 1/10 deel is van het gewicht.

Om zo min mogelijk af te wijken van de hedendaagse natuurkundepraktijk en anderzijds toch zoveel mogelijk recht te doen aan de fenomenen wordt gekozen voor de tweede oplossing, waar dan later de nu gangbare derde schrijfwijze goed op aansluit. Het kwalitatieve onderscheid tussen gewicht en massa wordt dan tot uitdrukking gebracht door f resp. m achter de eenheid kg te plaatsen. Is de fase van de acceptatie van de eenheden enigermate gevorderd, dan kunnen allerlei praktische situaties doorgerekend worden.

Voorbeeld 1. Een fiets met 2 personen weegt 100 kgf en rijdt 21,6 km/h = 6 m/s. Een leerling gaat er achter hangen en stopt de fiets in 5 m. Met welke kracht heeft de leerling getrokken? We nemen aan dat de remkracht constant was.

De remtijd voldoet aan:

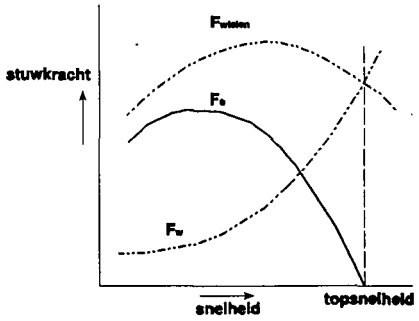
$$s = v_{gem} \cdot t = \tfrac{1}{2} v_{eind} \cdot t$$

$$5 = \tfrac{1}{2} \times 6 \times t \rightarrow t = 1{,}7 \text{ s}$$

De massa of standvastigheid van de fiets met twee personen is kwantitatief gelijk aan het gewicht, de massa is dus 100 kgm. De remkracht in kgf vinden we dus uit:

$$\frac{10F \times t}{v} = m \rightarrow \frac{10F \times 1{,}7}{6} = \rightarrow F = 36 \text{ kgf}$$

Opgaven met botsingen, veiligheidsriemen, een bal die omhoog geschopt wordt, twee leerlingen op skates met al dan niet extra leerlingen op de rug die elkaar wegduwen, enz, kunnen nu besproken worden. Het is daarbij van belang er steeds weer op te wijzen dat de totale stuwkracht gevormd wordt door de combinatie van de aandrijvende kracht en de wrijvingskracht.



Voorbeeld 2. Een automotor levert aan de wielen een stuwkracht, die afhankelijk is van de snelheid (zie grafiek). Wanneer de auto langzaam rijdt is er in verhouding weinig weerstand (F_w) en is het grootste deel van de stuwkracht beschikbaar voor de versnelling (F_a). Bij hogere snelheid neemt de weerstand meer dan evenredig toe; de beschikbare kracht voor de versnelling neemt dan af, totdat deze versnelling bij maximale snelheid nul is geworden en alle kracht gebruikt wordt om de weerstand te overwinnen.

4.4 Rotatie

Voorbeeld 1.

Als inleidende proef neemt men bijvoorbeeld een stevige stoel zonder wieltjes, waarvan de zitting met leuning kan draaien. Op deze stoel neemt een leerling plaats die zijn armen en benen uitstrekt. Door een flinke duw te geven wordt de leerling rondgedraaid. Wanneer deze vervolgens zijn armen en benen intrekt, zal het toerental toenemen. Geeft men de leerling een paar zware schoenen aan en enige zware gewichten in handen, dan zal het snelheidsverschil nog groter zijn. Door het uitgeoefende moment op de leerling en/of op de stoel is het geheel in draaiing gekomen. Het geheel heeft een bepaalde hoeveelheid draaiing gekregen, een impulsmoment. Als er geen uitwendige krachten zijn, dan blijft deze hoeveelheid draaiing behouden. Door het intrekken van de armen en benen neemt echter het traagheidsmoment van de leerling en de stoel samen af. De draaisnelheid neemt dan evenredig toe.

Voorbeeld 2: *het roterende fietswiel.*

Neem een vork van een fiets met een voorwiel erin. Draai het wiel flink snel rond. Het wiel kan nu zonder probleem door de ruimte verplaatst

worden zolang de richting van de draaiingsas niet verandert. Het draaiende wiel neemt een vaste stand in de ruimte aan.

Voorbeeld 3: *de gyroscoop.*

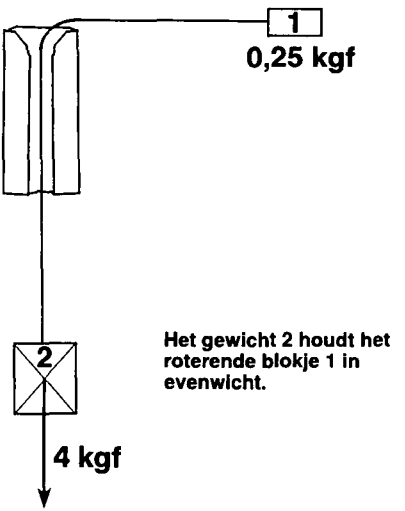
Er zijn in speelgoedzaken kleine en bij leermiddelenfirma's grote gyroscopen te verkrijgen. De beste hebben een cardan-ophanging. Hiermee kun je laten zien dat zo'n draaiend wiel zijn stand in de ruimte wil handhaven.

Als toepassingen van het rotatieprincipe kan men de volgende voorbeelden bespreken: Een centrifugaalregulateur om de draaisnelheid van eertijdse stoommachines te regelen. Voor windmolens is ook een centrifugaalregulateur ontworpen om bij storm een te hoge draaisnelheid te voorkomen.

Voorbeeld 4: *een rondslingerend gewicht.*

Neem een vierkant houten blokje met een gat erin en maak de volgende proefopstelling.

Slinger gewicht 1 (van 0,25 kgf) in het rond, meet de straal R en de tijd van 20 omwentelingen. We onderzoeken nu de relatie tussen F, R en T (periode) ten aanzien van blok 1, dat tijdens zijn beweging voortdurend van richting moet veranderen en waarvan de massa dus een invloed heeft. Begonnen wordt met een kleine straal en een hoog toerental van 4 omwentelingen per seconde, zodat het roterend gewicht zo horizontaal mogelijk kan blijven (anders zou de kracht ook nog samengesteld moeten worden). Uit meting vinden we de volgende gegevens:



R (m)	tijd van 20 omw.(s)	T (s)	T^2/R
0,25	5	0,25	0,25
0,44	6,7	0,33	0,25
1,00	10	0,5	0,25

Hier blijkt, net als bij de vrije val en de slingerbeweging, een kwadratische verhouding tussen afstand en tijd:

vrije val: $s = \frac{1}{2}a \cdot t^2 \rightarrow t^2/s$ = constant

slinger: T^2/l = constant

We handhaven het roterende gewicht 1 op ¼ kgf en halveren gewicht 2 tot 2 kgf. We meten opnieuw:

R (m)	tijd van 20 omw.(s)	T (s)	T^2/R
0,25	7	0,35	0,49
0,44	9,4	0,47	0,50
1,00	14,1	0,70	0,49

Uit de meetresultaten volgt dat het product $F \times T^2/R$ constant is bij een vast roterend gewicht. Halveert men het roterende gewicht, dan blijkt ook het quotiënt T^2/R de helft te worden. Dat wil zeggen dat het quotiënt $F \times T^2/R$ evenredig is met de massa van het roterende voorwerp:
$F \times T^2/R \propto m$. Wil men van deze evenredigheid een gelijkheid maken, dan moet men een constante invoeren:

$$F \times T^2/R = c \cdot m$$

Uit de metingen blijkt: $F \times T^2/R = 1$ bij $m = 0{,}25$. Hieruit volgt: c = 4. We vinden dus:

$$\frac{F \times T^2}{R} = 4 \text{ m}$$

Dit resultaat is in overeenstemming met de gangbare formule $F = ma = \frac{mv^2}{R}$ waarin F in newton is uitgedrukt. Dat is als volgt aan te tonen:

$$F = \frac{mv^2}{R} \rightarrow \frac{FR}{v^2} = m, \text{ waarin } v = \frac{2\pi R}{T}$$

Substitutie levert:

$$\frac{FR}{v^2} = \frac{FRT^2}{4\pi^2R^2} = \frac{FT^2}{4\pi^2R} = m$$

Met F in kgf wordt dit:

$$\frac{9{,}81\ FT^2}{4\pi^2 R} \approx \frac{FT^2}{4R} = m$$

Uit de formule $\frac{FR}{v^2} = m$ volgt dat bij constante baansnelheid v het product $F \times R$ constant is. Een rekenvoorbeeld hiervan is de volgende situatie. Een fietser rijdt met 28,8 km/h = 8 m/s en moet een bocht met straal $R = 5$m maken. De fietser met fiets weegt 80 kgf, de massa is dus 80 kgm. We berekenen de centripetale kracht. Zou de fietser een hele cirkel fietsen, dan zou de tijd voor een rondje gelijk zijn aan:

$$v = \frac{2\pi R}{T} \rightarrow T = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi \cdot 5}{8} = 1{,}25\pi \text{ s}$$

De centripetale kracht is dus:

$$F = \frac{m \cdot 4R}{T^2} = \frac{80 \cdot 4 \cdot 5}{(1{,}25\pi)^2} = 104 \text{ kgf}$$

Herhalen we deze berekeningen voor een straal van 7,5 en 2,5 m dan vinden we een centripetale kracht van resp. 69 en 208 kgf. Hieruit zien we dat de kracht omgekeerd evenredig is aan de straal. Dit verband is uit de eerder beschreven proef moeilijk te voorschijn te halen, daar dan de baansnelheid constant gehouden zou moeten worden. Samenvattend geldt voor een roterende massa:

$F \times R$ = constant wanneer v = constant

T^2/R = constant wanneer F = constant.

4.5 Energie

Dit begrip kan het beste als laatste behandeld worden, omdat het een tamelijk abstract en begrip is. Bij de begrippen vermogen en stoot, evenals bij massa dat als begrip al vrij ontoegankelijk is, is de mens nog direct als lichamelijk wezen betrokken. Ook het begrip uithoudingsvermogen is een ervaring in de tijd, die direct in de beleving van de vermoeidheid terug te vinden is. Het begrip energie is een voorgestelde grootheid. Meestal wil men die voorstelling zo concreet mogelijk maken door iets te zien bewegen of te werken. Als men zegt dat het water achter een stuwdam ten opzichte van het dal een bepaalde energie heeft, dan stelt men zich voor dat het naar beneden valt en dan dus veel teweeg brengt. Het gewicht van het water maal de valhoogte of de kracht maal de afgelegde weg noemen we de energie:

$$F \times h = F \times s = E.$$

Wordt het water of in het algemeen het voorwerp door de erop werkende kracht in beweging gebracht, dan ontstaat een versnelde beweging met een verplaatsing $s = \frac{1}{2} at^2$. Hieruit volgt een afgeleide energieformule:

$$F \times s = F \times \tfrac{1}{2} at^2 = E$$

$$\frac{F}{a} \cdot \frac{1}{2} (at)^2 = m \cdot \frac{1}{2} v^2 = E$$

$$\frac{1}{2} mv^2 = E$$

In deze formules is de kracht F uitgedrukt in newton. Met F in kgf moet nog de factor 9,81 erin opgenomen worden.

Een voorbeeld van de toepassing van het energiebegrip is: een voorwerp met een gewicht van 2,5 kgf wordt twee meter opgetild en valt dan vrij naar beneden. Bereken de eindsnelheid. De berekening gaat als volgt:

De arbeid om het voorwerp op te tillen geeft dit voorwerp op 2 m hoogte een energie van $E = F \times h = 2{,}5 \times 2 = 5$ kgf·m. Valt het voorwerp naar beneden, dan neemt zijn energie af en ontstaat er bewegingsenergie:

$$E = \frac{1}{2} mv^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{2{,}5}{9{,}81} \cdot v^2 = 5$$

$$v^2 = \frac{5 \cdot 9{,}81 \cdot 2}{2{,}5} = 39{,}24$$

$$v = \sqrt{39{,}24} = 6{,}26 \text{ m/s}$$

Wordt in de dynamica een te sterk accent gelegd op het energiebegrip, dan treedt een verschuiving op naar de bewegingsleer en wordt het belevingskarakter van de dynamica te sterk in het voorstellingsgebied getrokken.

4.6 Achtergronden en ideeënvorming

4.6.1 De relatie tussen kracht en beweging

De houding van de mens ten opzichte van de natuurverschijnselen hangt direct samen met zijn bewustzijnstoestand. Er is dan ook een duidelijke parallel waar te nemen tussen de ontwikkeling van de natuurbeschouwing en de bewustzijnsontwikkeling van de mens. In ieder tijdperk wordt de natuur als het ware weer met nieuwe ogen bekeken en worden gedachten gevormd over de natuurfenomenen en hun onderlinge samenhang op een manier, die karakteristiek is voor de geestesgesteldheid van die tijd. Dat was bijvoorbeeld in de bloeitijd van de griekse cultuur (circa 500 - 300 v. Chr.) een geheel andere gesteldheid dan in de Middeleeuwen. En met het aanbreken van de Nieuwe Tijd in de 15e eeuw verandert die geestesgesteldheid weer radicaal en daarmee de opvattingen over de natuur. Dit speelt zich af op alle terreinen van de fysica. Illustratief voor deze ontwikkeling zijn de denkbeelden die in de loop van de tijd gevormd zijn over de relatie tussen kracht en beweging.

In de inleiding op de bewegingsleer (paragraaf 2.1) is gewezen op de verschillen in beweging binnen de natuurrijken. Daarbij kunnen we onderscheiden:

- bewegingen (bij mens en dier) opgeroepen door een innerlijke kracht (motief, drift, instinct);
- bewegingen (bij plant en mineraal) opgeroepen door een uiterlijke kracht (zon, wind, gravitatie).

De grieken zagen nog een andere oorzaak van beweging, die hier als het ware het midden tussen houdt, namelijk de omgeving als drijvende kracht. Daarmee is iets anders bedoeld dan een blad dat door de wind wordt bewogen of een steen die door het water wordt meegesleurd. Bij de vorm van beweging waar hier op gedoeld wordt, gaat het niet om een materieel tastbare aandrijving in de zin van duwen of trekken, maar om de "wil van de omgeving". De omgeving heeft in de opvatting van de grieken een innerlijke wil, is bezield, is een van krachten doortrokken sfeer, die zijn invloed uitoefent op de voorwerpen en wezens die zich daarin bevinden. Zo is de groei van planten, de beweging van de planeten en zelfs de vrije val uitdrukking van de omgevingswil die tot deze bewegingen aanzet.

Deze griekse beschouwingswijze stemt overeen met een geestesgesteldheid, waarin aarde en kosmos nog als een levende eenheid werden beleefd, maar die deze beleving omvormde tot ideeën. Het aanschouwen en beleven van de scheppende krachten in de natuur was in vroegere tijden een algemeen vermogen. Maar om deze gewaarwordingen als ideeën in het bewustzijn te kunnen fixeren vroeg een nieuw vermogen: de individuele

denkkracht. De grote stap die in de griekse cultuur werd gezet was de ontwikkeling van dit individuele, zelfstandige denken. Dat vond plaats in de filosofie en in de natuurbeschouwing; daarbij werd de wiskunde beleefd als het oefenveld, waar een innerlijke scheppingsruimte voor het gedachtenleven ter beschikking stond en men zijn denkkracht onafhankelijk van de natuur door eigen activiteit kon versterken.

In de Middeleeuwen heerst een totaal andere geestesgesteldheid: de mens is niet zozeer gericht op de wereld om hem heen, maar veel meer op zijn eigen zielewereld. Dat hangt samen met de verwerking van de impuls die door het verschijnen van Christus op aarde teweeg is gebracht. Niet de goddelijke aanwezigheid in de kosmische en aardse sfeer staat op de voorgrond, maar de verbondenheid met God in de eigen ziel: daarvan wordt de middeleeuwse mens zich bewust. Die verbondenheid is echter niet een gegeven feit, die moet verworven worden. Het hoogste ideaal van de middeleeuwse mysticus was dan ook door reiniging en loutering van lichaam en ziel de eenwording met Christus te bereiken.

Dit streven vinden we terug in de opvatting over de beweging van de dingen. Een bewegend voorwerp wordt niet meer gezien als door de omgeving bewogen en gedragen, maar beweegt op grond van een eigen verlangen. Men drukte dit uit met het begrip "impetus". Een voorbeeld is de valbeweging: die ontstaat uit de innerlijke drang van de voorwerpen zich naar de aarde te bewegen, terwijl de omgeving daar juist remmend op inwerkt. Deze gedachte stemt overeen met het bewustzijn van de middeleeuwse mens, dat hij in zijn streven naar het goddelijke de weerstand van de uiterlijke omstandigheden steeds weer moest overwinnen.

Met de opkomst van de Renaissance, vanaf circa 1500, treedt een nieuwe omslag op. De mens gaat zichzelf steeds meer als een individualiteit beleven die op zijn eigen vermogens is aangewezen. Hij gaat zich weer sterker richten op de natuur om hem heen, maar nu niet meer in het beleven van verbondenheid zoals de grieken dat hadden, maar gedistantieerd. De mens beschouwt de natuur nu als buitenstaander, ervaart het goddelijke er niet langer in en heeft vooral oog voor de chemische en fysische wetmatigheden. Hij raakt geïnteresseerd in de wetten van de mechanica en doet onderzoek om die te leren doorzien. Daarbij speelt in de formulering van die wetten de wiskunde een belangrijke rol.

De opvattingen over kracht en beweging drukken deze nieuwe bewustzijnssituatie uit. Van een verlangen van een voorwerp naar beweging is geen sprake meer, alleen uiterlijke, mechanische krachten kunnen oorzaak van beweging zijn. Het voorwerp zelf volhardt in die beweging en verzet zich tegen een verandering daarin. Het krijgt de eigenschap van traagheid

toegekend, een vorm van behoudendheid, standvastigheid, tot uiting komend in zijn massa. Met de massa verbindt Newton het begrip van de gravitatie, waarmee zowel de vrije val als de planetenbewegingen wiskundig te beschrijven zijn.

In de loop van 18e en de 19e eeuw neemt de theorievorming in de natuurwetenschap sterk toe. De natuur wordt nog wel geobserveerd, maar de beschrijving van de verschijnselen gebeurt steeds meer vanuit de voorstelling die men van de samenhang heeft. De behoefte aan een samenhangend beeld is groot en men probeert zoveel mogelijk verschijnselen tot een beperkt aantal grondprincipes te herleiden. Het behoud van energie is zo'n grondprincipe. Dit wordt voor de relatie tussen kracht en beweging bepalend: de energietoestand kan een grotere potentiële (krachts)component hebben of een grotere kinetische (bewegings)component, wat bepalend is, is dat de som van beide constant is.

Bij bepaalde natuurverschijnselen blijkt de theorievorming niet sluitend te krijgen. Het licht is daarvan het meest bekende voorbeeld: in sommige aspecten doet het zich als golfverschijnsel voor, in andere heeft het deeltjeskarakter. In de wetenschap van de 20e eeuw wordt dit dualisme als tot op zekere hoogte onontkoombaar geaccepteerd. Men zou ook kunnen zeggen, dat er weer ruimte komt voor meerdere opvattingen naast elkaar. Ten aanzien van het hier beschouwde onderwerp komt dat bijvoorbeeld tot uiting in de twee verschillende opvattingen over het verschijnsel van de planetenbewegingen: Einstein beschouwt die als natuurlijke bewegingen zonder krachtsoorzaak als gevolg van de gekromde structuur van de ruimte, anderzijds wordt het nieuwe begrip 'gravitonen' geïntroduceerd, deeltjes die door aanstoting de werking van de gravitatieversnelling zouden overbrengen.

Zijn de gedachten van de 20e eeuw het laatste woord over de relatie tussen kracht en beweging? Dat zou alleen het geval zijn, wanneer de ontwikkeling van het menselijke bewustzijn tot stilstand zou komen. Er is geen aanleiding om daarvan uit te gaan, integendeel, veeleer zijn er signalen dat het natuurwetenschappelijke denken aan een volgende fase toe is. Zowel de uitwerkingen in de techniek van de huidige natuurwetenschap alsook de grenzen waarop deze in zijn begripsvorming stuit, geven aan dat nieuwe denkrichtingen en nieuwe denkbeelden aan de tijd zijn. Een aangrijpingspunt daarbij kan de wiskunde bieden. In het wiskundige denken beweegt de mens zich in een gebied waar hij het meest vrij is. Wanneer de natuurwetenschap erin slaagt de wiskunde niet alleen in zijn analytische kracht te benutten, maar hem als vorm van kosmische wijsheid te verbinden met de levenskrachten in de natuur, dan opent zich een nieuw perspectief. De projectieve meetkunde biedt in dat opzicht een veelbelovend begin. Het gaat er nu om,

dit begin verder te ontwikkelen en vruchtbaar te maken, zodat opnieuw aarde en kosmos met nieuwe ogen kunnen worden bekeken. Dat zal gepaard gaan met een bewustzijnssituatie, waarin de Christus-impuls niet alleen het gemoed maar ook het denken van de mens zal doortrekken en doorlichten.

4.6.2 De relatie tussen gravitatieversnelling, massa en gewicht

In de afgelopen eeuwen is het steeds meer vanzelfsprekend geworden om gravitatie, massa en gewicht terug te voeren op de stoffelijkheid van een voorwerp. Daarbij wordt die stoffelijkheid opgebouwd gedacht uit atomaire deeltjes en energieën. Deze worden als gegeven grondslag van alle fenomenen beschouwd. Bij de atomen kan de vraag naar de oorsprong dus niet meer gesteld worden: men neemt hun bestaan aan als paradigma. Nu kan ieder ander paradigma als werkhypothese gehanteerd worden, zolang de feiten geen geweld wordt aangedaan. De goetheanistische fenomenologie pleit voor een weliswaar tijdgebonden, maar paradigma-vrije kennisontwikkeling, waarbij alle waargenomen verschijnselen als op zichzelf staande feiten worden beschouwd, die vervolgens door het denken in relatie worden gebracht. Daaruit kunnen beoordelingen ontstaan over oorzaak en gevolg, waarbij oorzaken niet alleen causaal maar ook finaal kunnen werken. Blijft men trouw aan deze kennistheoretische grondregel, dan moet men gravitatieversnelling, massa en gewicht vooralsnog als drie zelfstandige fenomenen nemen. De relatie hiertussen kan pas inzichtelijk worden, wanneer zij ieder op zich grondig beschreven zijn.

De gravitatieversnelling

De aarde, de planeten, maar ook een brok steen of metaal hebben een versnellingsveld om zich heen. Dit veld is in het middelpunt nul en aan het oppervlak maximaal. Naar buiten is de gravitatieflux constant, dat wil zeggen de totale hoeveelheid gravitatie a door elk boloppervlak van $4\pi R^2$ is gelijk, zodat $4\pi R^2 \cdot a$ = constant. Hieruit volgt dat de intensiteit van de versnelling a omgekeerd evenredig is met het kwadraat van de afstand R tot het middelpunt van het voorwerp. Alle voorwerpen in een versnellingsveld op een bepaalde afstand van het middelpunt vallen/versnellen dus in gelijke mate, onafhankelijk van hun massa of gewicht.

Zo kan de snelheid van een planeet, die in het versnellingsveld van de zon een cirkelvormige baan beschrijft, bepaald worden uit de voorwaarde dat de snelheid v en de versnelling a op elkaar afgestemd zijn, dat wil zeggen de centrifugale versnelling door de valversnelling wordt gecompenseerd:

$$\frac{v^2}{R} = a \rightarrow v^2 = aR$$

We zien dat het mogelijk is om de planeetbeweging vanuit snelheid en versnelling te beschrijven zonder hierin gewichten of massa's te betrekken. De bewegingswetten van Kepler verfijnen deze beschrijving nog verder.

De massa

Er zijn drie manieren om tot het begrip massa te komen:

1. Van een voorwerp wordt de massa of standvastigheid berekend door het vrije deel van de kracht ($F_a = F_{tot} - F_{weerstand}$) in relatie te brengen met de tijd waarin de kracht werkt en de snelheid die het voorwerp krijgt:

$$\frac{F \times \Delta t}{\Delta v} = \text{massa}$$

Deze massa drukt het verzet uit tegen bewegingsverandering. Daarom is ook de term *standvastigheid* in plaats van massa op zijn plaats.

2. Een andere mogelijkheid om tot de massa van een voorwerp te komen is een voorwerp op te tillen met een kracht F en vervolgens vrij te laten vallen. Het quotiënt van kracht en gravitatieversnelling geeft de massa van het voorwerp:

$$\frac{F}{g} = \text{massa}$$

3. Een derde mogelijkheid wordt gevonden in het verschijnsel dat voorwerpen elkaar onderling (in geringe mate) aantrekken. Neem twee voorwerpen, zo mogelijk met een hoog soortelijk gewicht, en plaats deze vrij bewegend naast elkaar in een horizontaal vlak. De voorwerpen trekken elkaar nu met een zekere kracht aan. Deze aantrekkingskracht F is onafhankelijk van de plaats op aarde of in de ruimte. Wordt het totale volume van één van deze voorwerpen verdubbeld terwijl de afstand van centrum tot centrum wordt gehandhaafd, dan is de aantrekkingskracht twee keer zo groot. Deze kracht blijkt recht evenredig met de standvastigheid van beide voorwerpen en omgekeerd evenredig met het kwadraat van hun onderlinge afstand. In formule:

$$F \propto \frac{m_1 \times m_2}{r_2}$$

Willen we deze evenredigheid in de vorm van een gelijkheid schrijven, dan moeten we in de relatie een evenredigheidsconstante opnemen:

$$F = G \cdot \frac{m_1 \times m_2}{r^2}$$

Voor deze zogenoemde gravitatieconstante is de waarde $6{,}7 \cdot 10^{-11}$ Nm^2/kg^2 of $6{,}8 \cdot 10^{-12}$ $kgf \cdot m^2/kg^2$ gevonden. Twee loden bollen van 10 kg oefenen bijvoorbeeld op 15 cm een kracht op elkaar uit van:

$$6{,}8 \cdot 10^{-12} \times \frac{10 \times 10}{0{,}15^2} = 3 \cdot 10^{-8} = 0{,}03 \text{ mgf}$$

De standvastigheid of massa van een voorwerp wordt nu als volgt gevonden:

$$m_1 = \frac{Fr^2}{Gm_2}$$

In alle drie gevallen zien we dat de massa niet direct gemeten kan worden, maar uit berekening ontstaat. Gemeten worden kracht, afstand en tijd. De massa is een maat die onafhankelijk is van de plaats in de kosmos.

Het gewicht

Het gewicht van een voorwerp ontstaat wanneer een gravitatieversnelling weerstaan wordt en is in tegenstelling tot de massa wel afhankelijk van de plaats in de kosmos. Het gewicht is de kracht die nodig is om het voorwerp op zijn plaats te houden of de snelheid constant te houden. Is de gravitatie groot dan is ook het gewicht groot. Gravitatieversnelling en gewicht zijn evenredig.

De relaties tussen de drie grootheden

De eenvoudigste en mooiste relatie waar zowel gewicht, massa als gravitatieversnelling in voorkomen is:

$$\frac{F}{g} = m$$

De gravitatieversnelling is een ruimte-effect. Het is de ruimte zelf die deze kwaliteit heeft of krijgt. Het gewicht zelf is geen ruimte-effect, maar is wel afhankelijk van de plaats in de ruimte. De massa, die onafhankelijk is van de plaats in de kosmos, onttrekt zich als het ware aan de ruimte en spreekt zich alleen uit in tijdsprocessen. Zo leidt het quotiënt van gewicht en gravitatieversnelling tot een nieuw begrip, de massa, dat als hogere werkelijkheid in de ervaarbare werkelijkheid van kracht en beweging gevonden wordt.

Het gangbare standpunt beschouwt massa als identiek met hoeveelheid substantie, uitgedrukt in atomaire deeltjes, en ziet hierin het enige primair feitelijke. Gravitatieveld en gewicht worden als afgeleiden beschouwd. Vanuit de visie dat de ruimte een polaire structuur heeft, waarvan punt en oneindig verre vlak de grenzen zijn, is ook nog een andere beschrijving mogelijk.

Het gravitatieveld strekt zich oneindig ver in de ruimte uit. Het heeft geen tijd nodig om zich uit te breiden. Het is niet een veld dat ontstaat en vergaat, het is een dynamische toestand die als veld de ruimte structureert, waarbij het alzijdig naar een middelpunt is gericht. De gravitatie is als fenomeen met het oneindig verre vlak verwant en kenmerkt zich door een oriëntatierichting.

Massa daarentegen is punt-verwant. Het is een verschijnsel dat onafhankelijk is van de plaats in de ruimte en zich als het ware op elk punt van de ruimte kan incarneren en manifesteren. Massa is van nature middelpunt en verhoudt zich tot de ruimte zoals een wiskundig punt dat doet. Massa is gekenmerkt door zijn plaats en heeft geen uitbreiding of richting.

In de versnellingsruimte rondom een massapunt kan gewicht ontstaan, wanneer een voorwerp geremd, tegengehouden wordt in zijn beweging. De weerstand die de gravitatieversnelling weerstreeft, uit zich in het gewicht van het voorwerp. Het gewicht is maximaal, wanneer het voorwerp tot stilstand komt. Zo vormt het fenomeen gewicht de verbinding tussen de polaire verschijnselen massa en gravitatieversnelling en brengt die vanuit een potentiële toestand in de actuele, fysieke realiteit.

4.6.3 Massa en snelheid

Beweging is een ruimtefenomeen en wordt gekenmerkt door een richting. De massa, traagheid of standvastigheid van een voorwerp daarentegen heeft geen ruimte-aspect en kan als beeld door een punt getypeerd worden. Pas in een tijdsproces komt het massa-effect tot verschijning, namelijk door de bewegingsrichting of snelheid van een voorwerp te veranderen. De massa van een voorwerp wordt kwantitatief bepaald door het quotiënt van de stoot $F \times \Delta t$ en de snelheidsverandering Δv:

$$\frac{F \times \Delta t}{\Delta v} = \text{massa}$$

Nu kunnen niet alleen voorwerpen versneld, vertraagd of van richting veranderd worden, maar ook velden en bepaalde vormen van straling. We kunnen spreken over de standvastigheid van een veld. Zo heeft een elektrisch veld ook een massa, dat wil zeggen, het verzet zich tegen verandering. Hiermee is niet gezegd dat elektriciteit ook een ding-karakter heeft.

Bij velden met een massa is het bijzondere effect geconstateerd, dat de massa toeneemt wanneer de snelheid toeneemt. Dit is een voorbeeld van proces en tegenproces en te vergelijken met bijvoorbeeld verdampen (zie deel I, paragraaf 4.6). Verdampt een vloeistof, dan treedt afkoeling van de vloeistof op die de verdamping tegengaat. Wordt een veld versneld, dan

treedt massavergroting op om de snelheidstoename tegen te werken. De massa of standvastigheid van een veld is het kleinst, wanneer de snelheid van het veld nul is. Dit wordt de rustmassa genoemd. Denkt men dit fenomeen consequent door, dan spreekt zich hier de behoudende tendens van de natuur uit. De "natuurnijd", zoals Rudolf Steiner dat in de warmtecursus* noemde, accepteert geen verandering. De geworden natuur is in een bepaalde toestand en wil die handhaven.

Door snelheidsvergroting neemt de massa toe. We benaderen dit fenomeen vanuit de snelheid, omdat de mens die alleen kan variëren, terwijl de massa een onbeïnvloedbare factor lijkt te zijn. Zet men echter de gedachtengang van proces en tegenproces voort zoals dat bij warmte en koude in relatie met drukvariaties is gebeurd, dan kan men hier de vraag stellen - voorlopig als hypothese - 'wat zou er volgens proces en tegenproces moeten gebeuren als men de massa, dus de standvastigheid zou verkleinen?'

Het vergroten of verkleinen van de standvastigheid is in psychologische zin geen onbekend verschijnsel. Natuurkundig leek de wet van behoud van massa een haast alles overheersende te zijn. Maar sinds die door Einstein is gemodificeerd door massa en energie uitwisselbaar te veronderstellen, ligt daar meer ruimte. Zou men de rustmassa kunnen verkleinen, dan zou er beweging moeten ontstaan om het natuurevenwicht te handhaven. Hoe onttrekt men echter massa? Dit zal voorlopig een nog onbeantwoorde vraag zijn, die met zich meebrengt dat gravitatie, gewicht, massa en substantie op een andere wijze beschreven en doordacht moeten worden dan tot nog toe het geval is geweest.

verdamping heeft als tegenproces afkoeling
↑
natuurevenwicht
↓
compressie geeft als tegenproces verhitting

snelheidsvergroting heeft als tegenproces massavergroting
↑
natuurevenwicht
↓
massaverkleining geeft als tegenproces snelheidsvergroting

4.6.4 Bewustzijn en materie

Rudolf Steiner stelt in zijn voordrachtencyclus *Grenzen der Naturerkenntnis* dat in de tijd na 1500 twee met elkaar samenhangende vragen in de

* Rudolf Steiner: *Geisteswissenschaftliche Impulse zur Entwickelung der Physik* (2. Kurs).

menselijke ziel zijn opgekomen die om beantwoording vragen, namelijk: wat is de plaats en het karakter van het bewustzijn en wat die van de materie in mens en natuur? Hoe is de wetenschap met deze vragen omgegaan?

Vanaf 1500 is men *bewustzijn* steeds meer als een voortzetting van materiële processen gaan zien. Dit is te vergelijken met de manier waarop men naar bewegingsverschijnselen is gaan kijken. Zo moeilijk als het voor het natuurwetenschappelijk denken is om beweging als een zelfstandig verschijnsel te beschouwen, zo moeilijk is het ook om bewustzijn als een op zichzelf staand inherent systeem te denken en waar te nemen. Terwijl zo de oorzaak van alle beweging werd gezocht in druk- of stootkrachten van het ene voorwerp of deeltje op het andere, zo werd bewustzijn gedacht als een raadselachtige afscheiding van ingewikkelde chemische processen in de materiële grondslag van de hersenen.

Materie voert de mens in voor het denken volledig duistere en ontoegankelijke regionen. De hoedanigheid van de materie is nauwelijks te doorgronden. De vraag ernaar heeft de laatste eeuwen geresulteerd in een antwoord in de vorm van een model, het atoommodel, dat in zoverre een schijnantwoord vormt doordat dit het raadsel niet oplost, maar verlegt naar een micro-niveau van indirecte waarnemingen. Een waarneming, ook van de kleinste structuren, levert echter nooit het gezochte inzicht. Inzicht is niet uit waarnemingen af te leiden, het ontstaat doordat het denken aan het waargenomene ontvonkt en oplicht.

Naar twee kanten stuit de wetenschap dus op een grens: in de uiterlijke wereld onttrekt de materie zich aan een werkelijk inzicht, naar binnen toe vormt het bewustzijn een in wezen ondoorgrond gebied. Kunnen deze beide blokkades ook als uitdaging opgevat worden en tot springplank worden door verbreding en verdieping van de natuurwetenschap? Een eerste benadering in die richting kan zijn om in het kader van de mechanica de blik vrij te maken voor een vernieuwde beschouwing van die verschijnselen, die in de beleving met bewustzijn en materie correleren: namelijk *beweging en kracht*.

Zoals in paragraaf 2.7.4 is aangegeven wordt vanuit het paradigma van de huidige natuurwetenschap *beweging* gezien als gevolg van een uitwendige kracht die contact heeft met het object. Voorbeelden daarvan, al eerder genoemde en nog enkele ter aanvulling, zijn:

1. De planeten bewegen door een evenwicht van krachten, namelijk aantrekkende en middelpuntvliedende krachten.
2. Voorwerpen vallen ten gevolge van de aantrekkingskracht van de aarde.
3. Planten groeien, dieren bewegen en mensen handelen volgens het principe waarop een auto wordt voortgestuwd.
4. Het bloed beweegt doordat het hart werkt als een pomp.

5. Elektriciteit stroomt doordat elektrostatische krachten op elektronen worden uitgeoefend.

De binding van deze bewegingsfenomenen aan een veroorzakende kracht is echter niet noodzakelijk, ze kunnen ook als autonoom worden gezien:

1. Het planetenstelsel is primair een bewegingsorganisme, geen krachtensysteem. Dit bewegingsorganisme laat geen verstoringen toe: kracht treedt in verschijning om niet in het organisme passende tendensen te weerstaan.
2. De vrije val is een universele bewegingstendens die voor alle voorwerpen dezelfde is. Wordt de vrije val geremd, dan pas ontstaan er gewicht en kracht die de verstoring van de beweging in beeld brengen.
3. Planten, dieren en mensen zijn ook bewegingsorganismen. Al hun bewegingen en processen vinden hierin hun oorsprong. Op het fysieke vlak treden inperkingen op van deze bewegingen en processen; daaruit ontstaan de uiterlijke vormen en structuren.
4. Zo ontstaat het hart in de embryonale ontwikkeling op de plaats waar in de bloedstroom wervelingen optreden die uitdrukking zijn van de bewegingsmens.
5. Elektriciteit beweegt doordat het elektrische veld ontstaat en vergaat.

   Ervaart men deze beschouwingswijze als realiteit, dan opent dat de weg tot een volgende stap: zomin als beweging van kracht als oorzaak afhankelijk hoeft te zijn, zomin hoeft bewustzijn dat te zijn van materie. Bewustzijn kan, net als beweging, als autonome werkelijkheid bestaan. Het kan in relatie staan tot materie, maar wordt niet daardoor 'afgescheiden' of veroorzaakt.

Kracht wordt, zoals in paragraaf 3.4.4 beschreven is, in de huidige natuurwetenschap in wezen nog in mechanische zin opgevat. Maar in die opvatting schuilt een tegenstrijdigheid: de meeste krachten die in de fysica een rol spelen hebben niet het karakter van duwen of trekken, maar van werkingen op afstand. Dat geldt zowel voor de veldkrachten van het elektromagnetisme en de gravitatie als voor de krachten die voor de samenhang van de stof verantwoordelijk zijn. Kracht in de mechanische zin moet dus verbonden worden met kracht als werking in de ruimte, als invloed van niet-materiële aard op de structuur van de ruimte. Met andere woorden, kracht omvat twee bereiken: het materiële en het niet materiële; men kan ook zeggen, het materiële en het spirituele bereik.

Ervaart men dit als realiteit, dan kan men ook het raadsel van de materie een stap nader komen: evenals kracht een brug slaat tussen de werelden van het ponderabele en het imponderabele, zo doet materie dat ook. Materie kan pas doorgrond worden wanneer hij niet als pure stoffe-

lijkheid wordt gezien, maar als een neerslag van de geest in de stoffelijke werkelijkheid.

4.6.5. De aarde als samengesteld organisme

Volgens de paradigma's van de gangbare natuurwetenschap zijn alle verschijnselen terug te voeren op één oorzaak. De duizendvoudige fenomenen zouden op deze wijze voortkomen uit één "oeroorzaak". Deze zou in de stof te vinden zijn en zelf ook een stoffelijk karakter dragen. Alle gevolgen zouden door aanraking van objecten of via wisselwerkingsdeeltjes tot stand komen. Dit paradigma is in de loop van de geschiedenis steeds helderder naar voren gekomen en o.a. in 1842 door Du Bois-Reymond als zodanig geformuleerd. Willen we dit paradigma laten voor wat het is en de aardse verschijnselen fenomenologisch beschouwen, dan moeten we andere ideeën over oorzaak en gevolg niet uitsluiten.

De aarde is een gedifferentieerd geheel van verschijnselen, die afzonderlijk een dynamisch beeld vertonen, maar als totaliteit een grote mate van stabiliteit vertegenwoordigen, een subtiel evenwicht tussen behoudendheid en verandering. Nemen we de globale structuur in ons blikveld, dan kunnen we tot de volgende beschrijving komen:

1. De aarde heeft een schillenstructuur: de gelaagde structuur van de vaste aarde - aardkorst, mantel en kern - zet zich voort in die van de atmosfeer. Ook de elektrische lagen zoals de ozonlaag en de *F*-lagen tot enige honderden km hoogte vertonen een gelaagde structuur. De aarde is rond en draait. Het magneetveld van de aarde heeft een druppelachtige vorm, die met zijn open uiteinde altijd van de zon is afgekeerd. De structuur is niet concentrisch maar torusvormig, desondanks kan deze ook tot de omhullende structuren van de aarde gerekend worden. De magnetische as valt niet samen met de aardas en is ook niet recht (noord 73°NB 100°WL, zuid 69°ZB 143°OL). Het aardmagnetisch veld is aan veranderingen onderhevig. Deze hangen samen met het optreden van zonnevlekken, maar volgen ook een dag- en jaarritme. De structuur aan het aardoppervlak is zeer complex en de veranderingen verlopen meestal min of meer regelmatig of ritmisch.

2. Het gravitatieveld van de aarde heeft een radiale structuur die vrij constant en homogeen is; kleine variaties treden op afhankelijk van de aardlagen. Het centrum van het veld is het middelpunt van de aarde. Op het aardoppervlak bedraagt de gravitatieversnelling 9,83 m/sec^2 op de polen (naar de evenaar toe neemt deze waarde onder invloed van de aardrotatie iets af tot 9,78 m/sec^2). Verder van de aarde vandaan neemt de valversnelling

kwadratisch af met de afstand, zodat de totale flux constant is. In de aarde neemt de valversnelling min of meer lineair af tot, naar men aanneemt, nul in het middelpunt van de aarde.

3. Het warmteveld van de aarde is heel gedifferentieerd van structuur. Tussen de warmte uitstralende aarde en de zuigende koude kosmos vindt een voortdurende dynamische uitwisseling plaats. De zon verwarmt niet zozeer de atmosfeer als wel het aardoppervlak en de bovenlaag van de oceanen.

4. De zeer energierijke kosmische straling en de radio achtergrondstraling van de sterrenwereld hebben geen bepaalde richting maar zijn alom instralend werkzaam.

5. De denkende, voelende en handelende mens houdt met zijn intenties en werkzaamheid de aarde levend en de verbinding met de kosmos open. Deze stelling vraagt om een uitgebreide toelichting en verantwoording, want hij druist in tegen vele gangbare opvattingen, zoals bijvoorbeeld de opvatting van de mens als tijdelijk product van de aardse omstandigheden, ontstaan uit toevallige stoffelijke veranderingen, wiens gedachten, gevoelens en wilsintenties uit de stoffelijke structuren afgescheiden worden. Maar het innerlijk van de mens hoeft niet noodzakelijk als bijproduct van stoffelijke veranderingen te worden gezien, niets dwingt ons tot deze gedachte. Zo geldt ook dat de mens als geheel niet als een nevenproduct van de aarde genomen hoeft te worden. Zoals de mens ten aanzien van de eigen embryonale ontwikkeling met medewerking van de hele schepping aan zijn eigen lichaam bouwt en dit voortzet gedurende een lange opvoedingstijd, zodat hij zijn lichaam steeds persoonlijker kan gaan doorleven, zo is de mens medebouwer aan de aarde. De mens leeft niet op aarde als een product dat af is, maar draagt er steeds toe bij dat de aarde zich ontwikkelt, net als de mens die ouder wordt en daardoor steeds persoonlijker in het spanningsveld van denken, voelen en willen komt te staan. Zoals de mens eerst zijn lichaam opbouwt en daarna al doende verinnerlijkt, zo doet de mensheid dit voor de aarde als geheel. Rudolf Steiner heeft uitgesproken dat het doel van deze ontwikkeling een verinnerlijking, een vergeestelijking van de aarde is.

De hiervoor geschetste vier structuren in de schillenopbouw van de aarde, het gravitatieveld, de kosmische instraling, het warmteveld en de mensheid, staan in actieve wisselwerking tot elkaar en tot de kosmos. Men is er tegenwoordig aan gewend alle genoemde structuren, op die van de kosmische straling na, te laten voortkomen uit de stoffelijke eigenschappen van de aarde. Een andere mogelijkheid is deze structuren als van elkaar onafhankelijk te zien, als entiteiten die ieder voor zich bestaan en een eigen werkelijkheid met zich meebrengen en, op elkaar inwerkend, samen de

bijzondere constellatie van de aarde bepalen. In plaats van bijvoorbeeld te stellen dat door de warmtestromen in de mantel van de aarde elektromagnetische aardstromen ontstaan die het magneetveld van de aarde genereren, zou met evenveel recht ook gezegd kunnen worden dat het zelfstandige magneetveld van de aarde de aardspanningen genereert, omdat de magnetische polen niet samenvallen met de polen van de aardas waardoor kleine fluxveranderingen ontstaan. De aardstromen die zo ontstaan zouden dan in subtiele wisselwerking staan tot het evenzo zelfstandige warmteorganisme van de aarde.

Het voordeel van een dergelijke beschouwingswijze is dat dan de aarde als een totaalorganisme wordt gezien, met de verschillende 'schillen' als geledingen. Deze nieuwe invalshoek om de aarde te beschouwen verdient zeker de aandacht, temeer als men bedenkt dat binnen een discipline als de ecologie het steeds vaker vruchtbaar blijkt om de natuur als organisme te beschrijven. Vanzelfsprekend is het hier geschetste slechts een kleine aanzet in de aangegeven richting.

Pedagogisch gezien is het ook van belang dat we ons erin bekwamen los te komen van het soort denken dat de oorzaak altijd in het stoffelijke zoekt. Ons denken werkt als voorbeeld voor de leerlingen. Als wij denkend een zuiver onderscheid hanteren tussen verschillende entiteiten die met het organisme aarde verbonden zijn, dan geeft dat de mogelijkheid om bijvoorbeeld ook de menselijke ziel als iets zelfstandigs te zien en niet als een voortvloeisel uit het lichaam.

4.6.6 Aarde tussen zon en maan

In aansluiting op de vorige paragraaf, waar de aarde als een organisme werd beschouwd, willen we ook het planetenstelsel als een organisme zien dat van binnenuit een impuls tot bewegen heeft. Zoals bij de mens verstoringen van het bewegingsorganisme worden opgevangen en gekanaliseerd, zo worden verstoringen binnen het totaal aan bewegingen van het planetenstelsel geminimaliseerd door de verschillende delen van dit geheel.

In de formule $m_1 = \frac{Fr^2}{Gm_2}$ (zie paragraaf 4.6.2) is de verhouding $\frac{F}{m_2}$ de versnelling van massa 2 in het gravitatieveld van massa 1. Voor de aarde is aan het oppervlak de versnelling van alle dingen 9,8 m/s² (afstand tot het middelpunt van de aarde is $6730 \cdot 10^3$ m). Uitgaande van bovenstaande relatie volgt nu voor de standvastigheid van de aarde:

$$m_{\text{aarde}} = \frac{Fr^2}{Gm_2} = \frac{gr^2}{G} = \frac{9{,}8 \times (6730 \cdot 10^3)^2}{6{,}7 \cdot 10^{-11}} = 6 \cdot 10^{24} \text{ kg}$$

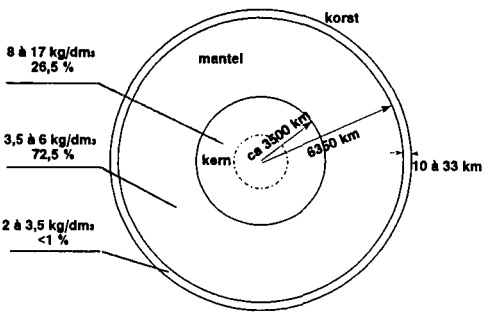
Nu heeft Newton zich al ten aanzien van de relatie tussen standvastigheid en stoffelijkheid van de aarde op de vlakte gehouden. Ons inziens zou het als een open vraag moeten worden beschouwd of de waarde van $6 \cdot 10^{24}$ kg die uit deze berekening volgt daadwerkelijk ook moet samengaan met een gewicht van $6 \cdot 10^{24}$ kgf van de aarde of met zo'n hoeveelheid substantie. We zouden namelijk de oorzakelijkheid van stoffelijkheid en gravitatieveld kunnen omkeren en in plaats van de stoffelijkheid als primair beginsel, waar warmte, magnetisme en gravitatie uit volgen, juist de warmte, het magnetische veld en de gravitatieversnelling als drie primaire entiteiten kunnen beschouwen. Het primaire gravitatieveld zuigt uit de omgeving of de kosmos de stof aan en drukt er zijn stempel op: een typisch ponderabele, verzegelende activiteit. Het gravitatieveld laat in zijn verschijning vier facetten onderscheiden:

1. het ruimtelijke effect, het aanzuigen;
2. het gravitatieveld is met de aarde verbonden;
3. het gravitatieveld op aarde heeft een gedifferentieerde structuur, waar door bijvoorbeeld ijzerertshoudende rotsen of zware dan wel lichte aardlagen gelokaliseerd kunnen worden;
4. de tendens van het gravitatieveld tendeert naar vergroting en versterking door zijn aanzuigende werking.

Deze optie om warmte, magnetisme en gravitatie als zelfstandige maar wel samenhangende entiteiten te zien is zinvol, omdat op een geheel nieuwe wijze naar de bouw van de aarde gekeken kan worden, die net zoveel recht van spreken heeft als de gangbare zienswijze. Het warmteorganisme van de aarde zou dan als een zelfstandige entiteit beschouwd kunnen worden, dat de warmteprocessen op aarde teweegbrengt. Zo kan ook het magneetveld van de aarde als een zelfstandige entiteit beschouwd worden, die gemodificeerd wordt door de geïnduceerde spanningen en stromen. Ook het gravitatieveld van de aarde kan als een zelfstandige entiteit gezien worden, die wordt gemodificeerd door de aangezogen stoffelijkheid. Volgens de gangbare beschouwingswijze wordt de massa of standvastigheid van de aarde gekoppeld aan een overeenkomstige stoffelijkheid. Bij de hier naar voren gebrachte zienswijze wordt deze relatie open gehouden, omdat hij niet dwingend aangenomen hoeft te worden.

In de gangbare visie wordt, om op een massa van $6 \cdot 10^{24}$ kg te kunnen komen, aangenomen dat de kern van de aarde bestaat uit een substantie met een soortelijk gewicht van 8 tot 17 kgf/dm^3. Nu blijkt uit seismografisch onderzoek dat de mantel wel maar de kern geen transversale golven doorlaat,

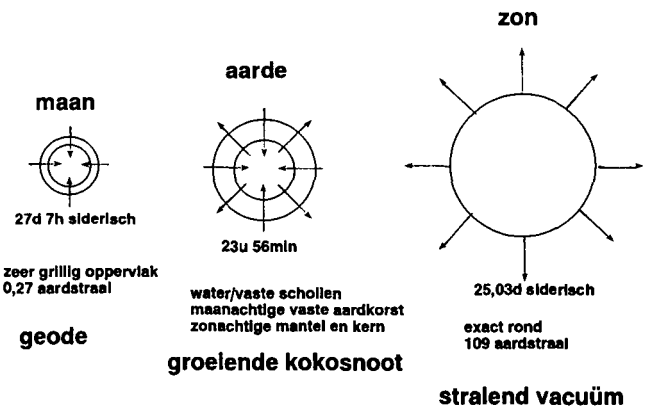
wat er mogelijk op wijst dat de stoffelijke toestand van de kern vloeistof- of gasachtig zou kunnen zijn. Uit natril-, galm- en echo-effecten heeft men afgeleid dat de aarde een vaste bolschaal heeft met daaronder een mantel die naar binnen toe vloeibaar wordt. Tevens blijkt dat de aarde naar binnen toe 10 à 30°C per km warmer wordt. Vanuit de hier geponeerde zienswijze is het niet nodig te veronderstellen dat de aardkern zo'n groot soortelijk gewicht zou moeten hebben als gangbaar wordt gedacht en hebben we de mogelijkheid tot een andere interpretatie van de waarnemingen te komen, die alle waarnemingen tot hun recht laat komen. Langs deze weg komen we dan tot het beeld van een vaste aardkorst, een vloeibaar/vaste gelachtige mantel en een gasvormige, mogelijk tripelpuntachtige kern. Zie figuur.



Hebben we eenmaal voor de aarde de koppeling tussen standvastigheid en stoffelijkheid losgelaten, dan kan ook de zon heel anders geïnterpreteerd worden, zoals bijvoorbeeld Steiner en Nieper dat hebben gedaan. Steiner plaatst daarbij de aarde tussen de zon en maan, die hij als tegengesteld beschouwd. In de volgende beschrijving willen wij hem hierin volgen. De zon wordt door hem beschreven als een boloppervlak, dat naar binnen toe geen, maar naar buiten toe wél stoffelijkheid bezit. Ten opzichte van de aarde kan de zon dan worden beschouwd als een binnenste buiten gekeerde gasplaneet. De standvastigheid of massa van de zon kan dan in dynamische samenhang worden gezien met haar uitstralende werking, die groter is dan de aanzuigende, zodat er in de zon geen stofophoping plaats vindt, maar er om de zon een gigantische atmosfeer wordt gevonden. De corona met zijn wisselende gestalte, de zonnevlammen, het zeer beweeglijke oppervlak, de rotatieverschillen tussen evenaar en polen en de spiraalvormige zonnewindarmen, die tot voorbij de saturnusbaan reiken, zijn allemaal fenomenen die wijzen op de zeer sterk uitstralende werking van de zon. Dit uitstralende karakter past in het hier geschetste beeld van de zon als binnenste buiten gekeerde gasplaneet.

Ook de maan kan zo in een ander licht worden gezien. Trillingen op de maan hebben een halfwaarde tijd tussen de 7 en 30 minuten. Op aarde is dit maximaal 1 minuut. Dit wijst erop dat de maan als een poreuze geode kan worden beschouwd: het oppervlak is ruw en er ligt een plakkerig soort maanstof op een poreuze, basaltachtig kristallijne ondergrond met veel ingesloten glasdeeltjes. Er is geen vloeistof of atmosfeer aanwezig. De maan kunnen we op deze manier beschouwen als een uitgedroogde levenloze aarde, die verhard, verbrokkeld en gekristalliseerd is.

In de hier gegeven beschrijving van de aarde staat de uitstralende werking van het warmteorganisme, alsmede de uitstralende gedachten, gevoelens en wilsintenties van de mens, in een spanningsveld met de werking van het gravitatieveld. Dit spanningsveld is op de zon veel sterker, waar de uitstralende tendens overheerst. Op de maan is het omgekeerde het geval, hier is het spanningsveld tussen punt- en periferie-gerichte tendensen zwakker en overheerst de instralende tendens, waardoor een atmosfeerloze, verdroogde en verharde verschijning ontstaat.

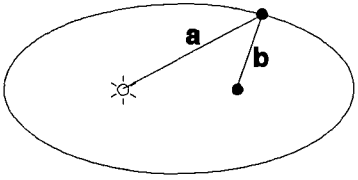


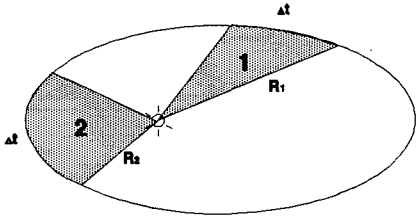
Maan en zon vormen de grootste tegenstelling. De aarde heeft de niet totaal uitgekristalliseerde en verbrokkelde maanwerking aan de buitenkant en de niet geheel uitstralende zonnewerking inwendig. Terwijl in deze beschrijving de maan de verstarrende gravitatiekrachten en de zon de uitstralende krachten vertegenwoordigen, is de aarde als een dynamisch evenwicht tussen beide uitersten te beschouwen. Overigens staat de mens voor de opgave in de eigen ziel steeds weer een verwant evenwicht te bewerkstelligen, tussen zielekrachten die tot illusie neigen en andere die het zieleleven dreigen te verstarren. Door deze krachten de juiste plaats te geven krijgen zij zin en betekenis. Zij schenken de mens dan de gave van het verlichten en oplossen aan de ene kant en het innerlijk verankeren aan de andere kant.

4.6.7 Kepler en Newton

De geschiedenis van de natuurwetenschap laat zien dat de mensheid in vroegere tijden vooral oog had voor de kosmos en dat pas geleidelijk de belangstelling voor de aardse omstandigheden zijn ontstaan. Copernicus, Kepler, Galileï en Newton leefden allen in de tijd dat hierin een omslag plaats vond. Copernicus en Kepler hielden zich nog geheel met de kosmos bezig. Bij Galileï en Newton heeft het brandpunt van de belangstelling zich al verplaatst naar het aardse vlak. Kepler zocht en beleefde de harmonie van de kosmos. Hij ging er vanuit dat de innerlijke sferenharmonie, waar de grieken zoals Pythagoras over spraken, uiterlijk tot uitdrukking moest komen in het planetenstelsel. Zo vond hij een relatie tussen de platonische lichamen en de afstanden tussen de planeten en naderhand zijn nog steeds actuele drie wetten, waarmee de bewegingen van de planeten beschreven worden. Newton was een alchemist en occultist en beschouwde de natuurkundige aarde als door de goden verlaten en wetmatig, zodat deze eenduidig beschreven kan worden. Op het gebied van de mechanica ontwikkelde hij zijn beroemde drie wetten.

De wetten van Kepler kunnen als volgt worden geformuleerd:





1. De planeten beschrijven ellipsen, met de zon in één van de brandpunten. Voor de baan geldt dat de som a + b constant is. Het tweede brandpunt ligt voor bijna alle planeten buiten de zonneschijf. De baan van dit tweede brandpunt geeft een verruimde blik op de relaties tussen de planeten.

2. De perkenwet: in gelijke tijden worden even grote oppervlakten beschreven. De snelheid in segment 1 is kleiner dan in segment 2. Is het tijdsinterval klein genoeg dan geldt bij benadering:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{v_2}{v_1}$$

of

$R \times v =$ constant langs de planeetbaan.

3. De derde wet van Kepler beschrijft de relatie tussen de afstand van de planeet tot de zon en zijn omlooptijd:

$$\frac{R^3}{T^2} = \text{constant voor alle planeten.}$$

Deze relatie kan ook anders geschreven worden: voor twee planeten geldt namelijk:

$$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{R_1^3}{R_2^3}$$

Met de benadering $v \approx \frac{2\pi R}{T}$ kan de derde wet van Kepler ook geschreven worden als:

$$v^2 \times R = \text{constant voor alle planeten.}$$

Voor de verschillende planeten presenteren we de gegevens over de 3e wet van Kepler in de vorm van een tabel:

	omlooptijd T (10^6 sec)	straal R (10^{10} m)	omloopsnelheid v (10^4m/s)	3e wet van Kepler $R \cdot v^2$ (10^{20}m^3/s^2)
Mercurius	7,60	5,79	4,79	1,33
Venus	19,4	10,8	3,50	1,32
Aarde	31,6	15,0	2,98	1,33
Mars	59,4	22,8	2,41	1,33
Jupiter	374	77,8	1,31	1,33
Saturnus	930	143	0,966	1,33

(N.B.: voor straal en omlooptijd zijn gemiddelde waarden genomen.)

De 1e wet van Kepler geeft een relatie tussen afstanden; de 2e wet een relatie tussen oppervlakten of producten van snelheid en afstand; de 3e wet een relatie tussen volumes en tijd in het kwadraat of snelheid in het kwadraat maal straal. Steeds meer dringt de vraag zich op wat een product of een verhouding in een formule betekent. Zegt de gedaante van de formule iets over de kwaliteit van de grootheid die ermee wordt uitgedrukt? Deze vraag zal in de volgende paragraaf behandeld worden.

De wetten van Newton zijn ontwikkeld als krachtwetten voor dingen. Deze wetten zullen hier op een iets andere manier gepresenteerd worden om het wezenlijke ervan te belichten.

1. De wet van de rust: ieder ding dat niet uit zichzelf kan bewegen komt tot rust. Een bewegend voorwerp dat volledig geïsoleerd van de aardse en kosmische ruimte wordt voorgesteld, zal eindeloos voortbewegen. Echter, of sterren en planeten systemen zijn die niet uit zichzelf bewegen, moet uit onderzoek blijken en kan niet op voorhand aangenomen worden.
2. Ieder ding heeft een standvastigheid of massa, dat wil zeggen, het verzet zich tegen verandering van beweging. Deze standvastigheid kan niet direct gemeten, maar wel berekend worden uit een dynamische proefopstelling, waarbij de versnellende kracht, de tijd en de afgelegde weg gemeten worden. Daarmee is de standvastigheid of massa dus geen meetbare grootheid maar een begrip (en daarmee niet minder reëel), afgeleid uit de relatie $F\Delta t/\Delta v$ = constant = m. Deze constante (massa) is onafhankelijk van de plaats in de kosmos.
3. Een kracht kan alleen werken wanneer er een tegenwerking is. De actie wordt voor 100% bepaald door de reactie, ofwel: de reactie bepaalt de actie. Deze derde wet beschrijft het gesloten krachtensysteem, terwijl de tweede wet het open krachtensysteem betreft waar een kracht een versnelling doet ontstaan.

Kepler beschreef de bewegingswetten voor de kosmos en Newton de krachtwetten voor de aardse omstandigheden. De laatste eeuwen zijn de zuivere bewegingswetten langzamerhand van het toneel verdwenen en worden zij alleen nog als afgeleiden beschreven van de wetten van Newton (inclusief zijn gravitatiewet). Er is weliswaar een relatie gebleken tussen de wetten van Kepler en die van Newton, maar dit betekent niet dat de eerste uit de laatste voortkomen.

4.6.8 Het is-gelijk teken

Bij de uiteenzettingen over de bewegings- en krachtenleer is de onderscheiding gemaakt tussen beleving, waarneming en begrip. In samenhang hiermee zal in deze paragraaf de betekenis van het is-gelijk teken beschreven worden aan de hand van het volgende voorbeeld:

beleving(1)	*waarneming(2)*	*begrip(3)*
snelheid	afstand, tijd	versnelling
$v = \frac{s}{t}$	s, t	$\frac{\Delta v}{\Delta t} = a$

Ad 1. Bij de beleving, dus bij een grootheid die als kwaliteit direct ervaren kan worden, drukt het is-gelijk teken uit dat deze primaire kwaliteit kwantitatief vastgelegd wordt. Op het gebied van beweging wordt bijvoorbeeld snelheid vastgelegd door het quotiënt van de grootheden afstand en tijd. Zo wordt in de statica de primaire kwaliteit kracht vastgelegd door vormverandering. Er is dus een directe relatie met één meetbare kwaliteit, de lengteverandering u:

$F = C \cdot u$ (C is de veerconstante)

In de dynamica wordt het begrip vermogen kwantitatief vastgelegd door het product van de grootheden kracht en snelheid:

$P = F \cdot v$

In alle drie gevallen houdt het is-gelijk teken dus geen vergelijking van kwaliteiten in. Het geeft ook geen kwantitatieve relatie weer. Het is puur het vastleggen van een oorspronkelijk beleefbare kwaliteit in kwantitatieve eenheden. Bij het voorbeeld van kracht is dit wel het meest duidelijk: de kwaliteit kracht wordt vastgelegd door de kwantiteit afstand. Nu kan men deze kwantitatieve uitdrukkingen vergelijken met de menselijke activiteit, die met de betreffende grootheid het meest samenhangt. Bij beweging, waar de mens via de voorstelling een beeld van de werkelijkheid vormt, is de meest indirecte verbintenis met de wereld voorhanden, wat kwantitatief tot uitdrukking komt in een relatie of quotiënt van grootheden. Bij kracht is de mens via de handeling of de wil het meest direct met de wereld verbonden. Dit resulteert ook in de meest directe kwantitatieve relatie. In de dynamica, waar bewegings- en krachtenleer elkaar ontmoeten, zoals bij de mens denken en doen in het voelen samenkomen, vindt men steeds het product van twee grootheden. Deze relatie tussen de mens en de kwantitatieve uitdrukking zal verderop nog nader worden uitgewerkt.

Ad 2. Bij het vastleggen van een waarneembare grootheid geeft het is-gelijk teken aan hoeveel maal de afgesproken eenheid aan de gemeten waarde gelijk is: $l = 6$ m betekent dat de gemeten lengte 6 maal zo groot is als de eenheid van afstand, de meter. Hier is het is-gelijk teken dus wel een vergelijkingsteken dat uitdrukt hoeveel maal een kwantiteit groter is dan de afgesproken eenheidskwantiteit.

Ad 3. Wanneer een nieuw begrip geïntroduceerd wordt, zoals versnelling, dan hangt dit volgens een bepaalde kwantitatieve relatie samen met de reeds ontwikkelde primaire kwaliteiten en meetgrootheden. Door $\Delta v/\Delta t = a$ te schrijven (het nieuwe begrip komt dus na het is-gelijk teken) brengt men tot uitdrukking dat door het quotiënt $\Delta v/\Delta t$ een nieuwe typering van een beweging ontstaat, die we versnelling noemen. Is de versnelling constant, dan beleven we dit als kracht. Verandert de versnelling in de tijd, dan ervaren we dit als ritme. Is de versnelling nul dan komen we los van de wereld in de voorstelling, zoals bij het rijden in een auto op de snelweg. Ook bij nieuw geïntroduceerde begrippen valt op dat het quotiënt in de bewegingsleer, het product in de dynamica en de directe relatie in de statica gevonden wordt:

bewegingsleer	*dynamica*	*statica*
$\frac{\Delta v}{\Delta t} = a$	$F \times t = S$	$\frac{F_1}{F_2} = \frac{a_1}{a_2}$
versnelling	stoot	momentenstelling

Bij de momentenstelling laat het is-gelijk teken de gelijkheid van een dimensieloze verhouding zien. Dat deze stelling ook als product ($F_1 \times \text{arm}_1 = F_2 \times \text{arm}_2$) geschreven kan worden, laat alleen zien dat wiskundig iedere schrijfwijze gerechtvaardigd is, maar dat de natuurkwaliteit en de eigenlijke menskundige waarde daarmee toegedekt wordt.

Nu volgen nog enige voorbeelden uit andere gebieden van de natuurkunde. Bij alle formules waar een nieuw begrip ontstaat uit een *quotiënt* van twee kwalitatief ongelijke grootheden, heeft men te maken met een *voorstellingsbegrip* dat iets zegt over de substantie:

$$\frac{\text{kracht}}{\text{oppervlak}} = \text{druk} \qquad \frac{\text{massa}}{\text{oppervlak}} = \text{druk} \qquad \frac{\text{spanning}}{\text{stroom}} = \text{weerstand}$$

Bij formules waar een nieuw begrip ontstaat door het *product* van twee ongelijke kwaliteiten, ontstaan begrippen die een *dynamisch* karakter hebben:

stroom × spanning = vermogen
stroom × tijd = lading
capaciteit × spanning = lading

Formules waarbij het om *directe verhoudingen* gaat drukken een spanningsveld uit waar kwaliteiten elkaar in *evenwicht* houden. Bijvoorbeeld:

2e wet Kepler: $$\frac{R_1}{R_2} = \frac{v_2}{v_1}$$

3e wet van Kepler: $\frac{R_1}{R_2} = \frac{v_2^2}{v_1^2}$

lichtbreking: $\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{\text{loodrechte bakdiepte}}{\text{loodrechte beelddiepte}}$

wet van Boyle-Gay Lussac: $\frac{P_1}{P_2} = \frac{V_1}{V_2}$ en $\frac{P_1}{P_2} = \frac{T_1}{T_2}$

Uit meerdere producten samengestelde formules krijgen echter weer meer een voorstellingskarakter. We komen dan van het dynamische gebied in de abstracte voorstellingswereld. Voorbeelden hiervan zijn:

$F \times v \times t = F \times s$ = energie (potentieel)

$\frac{1}{2}\, m \cdot v^2$ = energie (kinetisch)

Uit dit laatste voorbeeld komt de tegenstelling tussen de snelheid, die als kwaliteit bij de massaloze ruimte hoort, en de puntvormige massa prachtig tot uitdrukking. Er is een kwadratisch verband tussen de wereld van de beweging en de wereld van de samenballing. Deze relatie van v^2 tot een ponderabele kwaliteit komt tot uitdrukking bij:

geluidssnelheid in vaste stoffen	$v^2 = E \cdot sv$	v = geluidssnelheid E = elasticiteitsmodule sv = soortelijk volume
geluidssnelheid in vloeistoffen	$v^2 = M \cdot sv$	M = volume elasticiteit
golfsnelheid van de snaar	$v^2 = \frac{F \cdot l}{g}$	F = spankracht l = lengte g = gewicht van de snaar
licht/ elektriciteitsleer	$c^2 = \frac{1}{E_0} \cdot \frac{1}{\mu_0}$	c = lichtsnelheid E_0 = dialectische constante μ_0 = magn. permeabiliteit
slinger	$T^2 \propto l$	T = slingertijd l = slingerlengte

xylofoon	$f^2 \propto l$	f = toonfrequentie l = lengte
energie/massa	$E = mc^2$	

De Einstein-formule laat de relatie tussen de massa als verdichtende grootheid en het kwadraat van de snelheid als ruimtekwaliteit in optima forma zien. De massa is onafhankelijk van de plaats in de ruimte en de lichtsnelheid hangt samen met de overgang van potentie naar act. De polaire structuur van de ruimte krijgt nu nog meer inhoud. Verder onderzoek in deze denkrichting is nodig.

4.6.9 Vectoren en de ruimte

Voor alle begrippen geldt dat ze een naam en een eenheid hebben. Zo geldt voor een afstand van 6 m: afstand = 6 × 1 meter
en voor een kracht: $F = 10 \times 1$ kgf

De verschillende kwaliteiten en begrippen zoals afstand, energie, vermogen, massa e.d. staan echter niet allemaal op dezelfde manier in verhouding tot de ruimte. Snelheid heeft een andere relatie tot de ruimte dan energie en energie heeft weer een andere relatie dan vermogen of massa. Wanneer men nu de verschillende kwaliteiten zoals snelheid, kracht en vermogen en de verschillende begrippen zoals moment, versnelling, massa, energie en stoot onderzoekt op hun relatie tot de ruimte, dan is de gangbare indeling in vectoriële en scalaire grootheden niet toereikend.

De scalaire grootheden hebben aan één maat genoeg, ze hebben geen bepaalde oriëntatie in de ruimte. Scalaire grootheden zijn bijvoorbeeld afstand, tijd en energie. Het zijn afspraken zoals afstand en tijd of voorstellingen zoals energie, die niet een bepaalde stand in de ruimte innemen. Een afstand van 6 m kan in vele richtingen uitgezet worden. Ik kan mij 6 m voorstellen zonder oriëntatie op de omgeving, zonder dat het één bepaalde richting heeft.

Van het vermogen kan men zeggen dat het ook geen ruimterichting heeft, maar vermogen heeft wel altijd te maken met een (concreet) proces. Met vermogen wordt de intensiteit van een proces uitgedrukt. Een proces dat betrekking heeft op ontstaan en vergaan, een proces dat samenhangt met een in de ruimte verschijnen. Het vermogen drukt de relatie uit tussen het oneindig ideële onruimtelijke en het eindig concrete ruimtelijke. (Zie hiervoor ook paragraaf 4.2).

Als vierde karakteristiek treedt de massa op. Dit is ook een scalaire grootheid, maar niet zoals lengte en tijd. Massa oriënteert zich op een punt

in zichzelf. Het onttrekt zich aan de ruimte, maar is ook niet onruimtelijk of voorstellingsachtig. Er zijn dus 4 typeringen te onderscheiden in relatie tot de ruimte:

onruimtelijk ⟶ vermogen $P=\vec{F}\cdot\vec{v}$

↕ ruimterichting (vector) ⟶ snelheid, kracht, stoot $\vec{F}t$
moment $\vec{F}\times\vec{s}$, impuls $m\vec{v}$

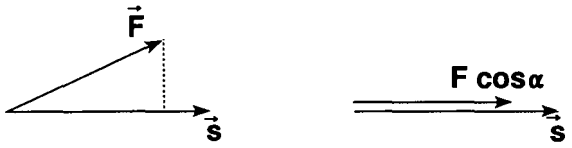
ruimtelijk of voorstelbaar ⟶ afstand, tijd energie arbeid

onderruimtelijk ⟶ massa

In de wiskunde onderscheidt men bij de vectormeetkunde o.a. het inwendig en het uitwendig product, ofwel het scalaire product en het vectorproduct.

Scalair product of in-product

Een scalair product van twee vectoren is b.v. arbeid of energie: $\vec{F}\cdot\vec{s}=E$. De afstand $\vec{s}$ heeft nu wel een richting, omdat een heel bepaalde afstand t.o.v. de kracht $\vec{F}$ gekozen wordt.



Het scalaire product stelt meetkundig een lineaire waarde voor. Energie is een scalaire en dus eendimensionale grootheid. Nu zijn er nog andere scalaire producten zoals het vermogen $P=\vec{F}\cdot\vec{v}$. Deze grootheid heeft echter een andere kwaliteit.

Het vermogen geeft de lineaire relatie weer tussen de twee polaire aspecten punt en oneindig ver vlak van de ruimte. Het is als het ware een macrokosmische verbinding, terwijl het energieprodukt (de arbeid) een microkosmische eendimensionale voorstelling is. Het scalaire inproduct "vermogen" ontstaat vanuit een proces, waarbij twee polaire kwaliteiten samenwerken. Het is een ontstaansproces waar ruimte en onruimtelijk zijn beide een rol spelen. Het is een in elkaar werken van kwaliteiten van kracht

en beweging $P=\vec{F}\cdot\vec{v}$. Het vermogensaspect van een proces is altijd ruimte-georiënteerd. Bij het vermogen komt men volledig in de ruimterichtingen, terwijl men bij het voorstellingsbegrip arbeid/energie in de lineariteit van het denken zit. Het scalaire inproduct geeft een begrip (microkosmos, voorstellingsdenken) òf een reëel proces weer (macrokosmos, procesmatig).

begrip	*proces*
$E=\vec{F}\cdot\vec{s}$	$P=\vec{F}\cdot\vec{v}$
$E=q\cdot V$	
$Q=V\cdot C$	

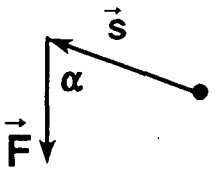
Vectorieel product of uitproduct

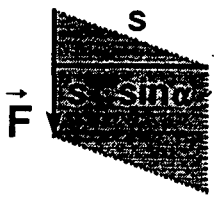
Een uitproduct van twee vectoren is bijvoorbeeld het moment:

$$\text{kracht} \cdot \text{arm} = M$$

$$F \cdot s \sin\alpha = M$$

$$\vec{F}\times\vec{s} = \vec{M}$$





De afstand heeft ook hier duidelijk bepaalde richting t.o.v. $\vec{F}$. Het vectoriële product stelt meetkundig de oppervlakte voor van een parallellogram, opgespannen tussen $\vec{F}$ en $\vec{s}$. In de vectormeetkunde wordt de vector $\vec{M}$ loodrecht geplaatst op het vlak van $\vec{F}$ en $\vec{s}$ en heeft een richting die bepaald wordt door $\vec{F}$ en $\vec{s}$.

Het uitproduct geeft de activiteit weer. Beschrijft men een scalair product zoals energie als een intrinsieke waarde van een systeem, dan kan men het vectoriële product als een extrinsieke waarde benoemen. Het is naar buiten gericht, het geeft een "act" weer.

Scalar en vector

Heeft men een vectoriële grootheid en wordt deze vermenigvuldigd met een scalar, dan heeft het nieuwe begrip ook een vectorieel karakter.

Bijvoorbeeld de stoot behoudt door de krachtvector $\vec{F}$ of de snelheidsvector $\vec{v}$ de vectoriële eigenschappen: $\vec{F}t = \vec{p} = m\vec{v}$. Mogelijk gaan de formules op deze manier beschouwd meer spreken dan alleen met de formele wiskundige uitdrukking.

Grootheden in relatie tot de mens

Naast de relatie tot de ruimte kan men ook kijken naar de relatie tot de mens. De volgende typeringen zijn mogelijk.
Het *vermogen* kan gezien worden als een geboren worden in de ruimte. De ruimte wordt doordrongen met kracht en beweging. Het gaat hier steeds om een proces. De ruimte wordt als het ware geopend voor een proces dat gestructureerd wordt vanuit het niet-ruimtelijke.
Energie is te typeren als een lineair voorstellingsbegrip.
Massa is te zien als de standvastigheid, als het zich verzetten tegen meebewegen.

Op een vergelijkbare wijze kan men bij de mens bovengenoemde kwaliteiten ontdekken. De ik-beleving van ieder mens kan zich op drie manieren uiten. Twee manieren zijn op een bepaalde manier vast en de derde heeft het beweeglijke en verbindende in zich. De ene verstarring treedt op als een mens te veel in de voorstellingen gaat leven. Te veel alleen "in het hoofd". We zitten dan aan de kant van de natuurkundige begrippen als energie, afstand en tijd. Een andere vorm van verstarring treedt op als een mens te veel met de stof bezig is, te zeer georiënteerd op het doen. Deze kant kan men de ledematenkant noemen en we kunnen de kwaliteit van standvastigheid van de materie daarbij noemen. In het tussengebied, het gebied van de ritmische processen in de mens, valt wat betreft de natuurkundige grootheden uiteen in enerzijds de procesgrootheid vermogen, die verbindingen schept, en anderzijds de grootheden die met een oriëntatie op de ruimte overeenkomen, zoals snelheid, kracht, impuls en moment.

voorstellingen en afspraken
energie, afstand en tijd

proces
vermogen

oriëntatie (vectoren)
snelheid, kracht, impuls, moment

eenzijdige standvastigheid
massa

5. VERTELSTOF IN DE TIENDE KLAS

5.1 De vertelcultuur in de Vrije School

In het Vrije Schoolleerplan is veel plaats ingeruimd voor vertelstof. In de onderbouw trekken in rijke beelden sprookjes, legenden, fabels, mythen en sagen aan de kinderen voorbij. Door deze stroom van beelden wordt niet alleen de ziel gevoed, ook wekken zij sluimerende impulsen in de kinderen. Er resoneert iets in hun ziel als zij horen dat Iwan, die altijd op de kachel lag en uit een erwt geboren werd, over wonderbaarlijke krachten blijkt te beschikken en door humor, moed en kracht de draak weet te verslaan die een heel mensenrijk in zijn ijzeren greep hield. Naar het einde van de onderbouw toe wordt de vertelstof steeds meer op de wereld gericht: de griekse mythen, de romeinse cultuur, de ontdekkingsreizen, er komt een steeds grotere actieradius.

Omstreeks de 9e klas vindt een omslag plaats. In de puberteit ontwaakt in de leerlingen het besef van het eigen innerlijk. Het vertellen van biografieën sluit hier goed bij aan. Dat mensen, ondanks dat zij tegenslag en verzet ondervinden, door hun daden soms een verrassend grote invloed op de samenleving kunnen uitoefenen, kan op deze leeftijd van grote innerlijke onzekerheid zeer bemoedigen. Vanaf klas 10 kan men de schijnwerpers richten op bepaalde levensthema's, die als een rode draad door biografieën lopen. In het leven van Nicolaas Cusanus bijvoorbeeld neemt het streven de tegenstelling te overbruggen tussen verstand en gevoel, tussen de westerse en oosterse cultuur, een belangrijke plaats in. Vanuit dit streven tracht hij niet alleen in de wetenschap vernieuwingen tot stand te brengen, maar ook op sociaal gebied, binnen de kerk. Op een leeftijd waarin de leerlingen hun sociaal oordeelsvermogen gaan ontwikkelen, kunnen zij opzien naar iemand die vanuit een sociale bewogenheid krachtig handelde.

Op deze manier kan de behandeling van biografieën een algemene dimensie toevoegen aan het vak als zodanig. Voorop staat natuurlijk dat de wijze waarop zo'n biografie in de verdere lesstof wordt ingebed, past bij de ontwikkelingsfase van de leerlingen. Hoe dit kan worden aangepakt, zal in dit hoofdstuk aan de hand van de biografieën van Galileï en Cusanus, die beide in de 10e klas kunnen worden verteld, worden getoond.

Enige didactische opmerkingen zijn wellicht op zijn plaats. Het vertellen van een biografie moet in de grote lijn geschiedkundig verantwoord zijn, maar ten aanzien van de details doet men er goed aan zelf de accenten te leggen. Wil het verhaal daadwerkelijk aanspreken, dan dient men steeds te scheppen uit een eigen beeldenstroom. Een beeld komt alleen bij leerlingen over als het de verteller op dat moment voor ogen staat. Het moet

worden gezien! Een "prachtige" steen zegt hen niets, een korte, treffende karakteristiek daarentegen wel. Men zal dus de eigen fantasie krachtig moeten aanspreken om telkens nieuwe beelden te ontwikkelen. Hier ontstaat het gevaar zich te verliezen in te zweverige of te spectaculaire beelden. Beide schieten aan het doel voorbij. Lukt het de docent zich door de klas te laten inspireren in de keuze van het "wat en hoe" van de vertelstof, dan zal in aansluitende gesprekken het algemeen menselijke element dat in het verhaal naar voren komt met de overige lesstof verbonden kunnen worden.

5.2 Het vertellen in de 10e klas

Hoewel het vertellen in elke natuurkundeperiode een wezenlijke bijdrage kan leveren aan het geheel, zal de plaats die het in de context van de periode inneemt per leerjaar verschillen. In de 9e klas vormen biografieën van uitvinders als James Watt, Edison en Faraday een aanvulling op de technisch-inhoudelijke behandeling van hun ideeën. In de 10e klas kan door het vertellen de blik gericht worden op het geboortemoment van de moderne wetenschap en de omslag die plaatsvond in de houding van de mens tegenover de natuur. Door enige biografieën kan dit omslagpunt in beeld gebracht worden, terwijl de vergelijking van het wetenschappelijke denken in middeleeuwen en moderne tijd de omwenteling in kaart brengt die rond 1600 plaatsvond. Dit thema wordt in de volgende paragraaf nog nader uitgewerkt.

De biografie van Galileï (1564 - 1642) vat de revolutie in de wetenschap wellicht het beste samen. Galileï's meest cruciale experimenten zijn tevens zeer geschikt om aan de klas te worden getoond. Ook kan naar aanleiding van het vertellen gedemonstreerd worden hoe Galileï verschillende verschijnselen als de val en de slingerbeweging met elkaar verbond.

Terwijl Galileï de materialistische opvattingen bij uitstek vertegenwoordigt en geloof en wetenschap bij hem gescheiden categorieën waren, was Cusanus (1401-1464) een zeer universele denker, waarbij religieuze, wetenschappelijke en filosofische opvattingen een geheel vormden. Tevens was hij een denker van een dusdanig kaliber, dat zijn kennistheorie de toon zet voor de latere ontwikkeling van de fenomenologie.

Op deze twee belangwekkende figuren zal hier exemplarisch wat dieper worden ingegaan, maar daarmee zijn de mogelijkheden nog geenszins uitgeput. Uit de biografie van Newton (1642-1727) blijkt hoezeer de scheiding tussen religie en wetenschap in sommige gevallen zich kon voltrekken in één leven. Na de dood van zijn moeder raakte Newton in een geloofscrisis, omdat hij aan haar sterfbed ervaart, dat hij zich niet los kan maken van zijn neiging tot koele observatie. Hij blijft de wetmatigheden van

het ziekteverloop registreren. Hij stelt zich de vraag: is er in een wereld, die zozeer door wetmatigheden wordt geregeerd, wel plaats voor God? Newton zag, als een van de grondleggers van het mechanistische wereldbeeld, de wereld als een perfect lopend uurwerk, waarin processen volgens vaste regelmaat verlopen. Hoewel hij zelf een zeer religieus mens was en zich op latere leeftijd steeds meer aan de studie van theologie en alchemie wijdde, waren zijn wetenschappelijke ontdekkingen een grote bazuinstoot voor de ontwikkeling van het materialisme en de hiermee samenhangende scheiding tussen wetenschap en geloof.

Bij Johannes Kepler (1571 -1630), wiens ideeën over de planeetbanen later door Newton werden opgepakt om deze in overeenstemming te brengen met zijn zwaartekrachtwet, waren wetenschappelijke ontdekkingen en religieuze ervaringen nog sterk verbonden. De drie wetten over de planeetbanen die hij opstelde zijn van grote wiskundige schoonheid. Dit kan worden teruggevoerd op een belangrijke jeugdervaring. Als veertienjarige beleefde hij aan de schoonheid van de sterrenhemel "de harmonie der sferen", de geestelijke harmonie die voor zijn gevoel van de kosmos uitging. In zijn latere werk bleef hij door de wiskundige samenhangen heen deze geestelijke krachten ervaren. Deze ervaring werd door zijn tijdgenoten niet herkend, terwijl zijn drie wetten wel een belangrijke bijdrage leverden in het ontstaan van de materialistische wetenschap.

De hier gekozen biografieën van Galileï en Cusanus sluiten vooral aan bij de behandeling van de bewegingsleer. Ook de behandeling van de biografie van Kepler zou vooral bij de bewegingsleer aansluiten, hoewel zijn werk zich sterk richtte op de hemelverschijnselen en van een sterke religiositeit was doortrokken. Het werk van Newton daarentegen richtte zich in grote mate op de aardse realiteit en op de wil van de mens de aarde te bewerken. De behandeling van zijn biografie zou daarom goed aansluiten bij de behandeling van de statica en dynamica.

5.3 De geboorte van de moderne wetenschap

Dat de mechanica de wieg is geweest voor de geboorte van de moderne wetenschap kan niet als toeval worden beschouwd. Tijdens de Renaissance begon de mens vanuit een zelfbewuste houding tegenover de natuur te denken. Het door de goden losgelaten en nu geheel zelfstandige denken van de mens vond zijn eerste houvast en ankerplaats in de materialistische beschouwingswijze en de mechanische verschijnselen vormden van nature de eerste oefenplaats. Het is een meesterlijke aanwijzing van Rudolf Steiner geweest de mechanica als thema voor de 10e klas natuurkundeperiode te kiezen. Op deze leeftijd worden de leerlingen "aarderijp" en zijn zij in

staat vanuit een zelfbewuste houding over de wereld na te denken. Een 10e klasser kan bewondering voelen voor de koenheid en onverschrokkenheid waarmee een Galileï geheel zelfstandig tot zijn opvattingen kwam en de gevestigde eeuwenoude wijsheden terzijde schoof. Zoals het voor de gehele mensheid de opgave is om oude helderziende vermogens om te werken tot zelfstandige geestelijke vermogens en het materialisme hierbij een doorgangsstadium is, zo is het ontwaken voor de abstractie bij de 10e klasser een overeenkomstig ontwikkelingsmoment.

In de Middeleeuwen had de mens nog een laatste rest van zijn oorspronkelijke verbondenheid met de geestelijke wereld behouden. Men dacht nog over de natuur in termen van religieuze concepten. De religieuze opvattingen vormden nog een geheel met de wetenschappelijke. De begrippen die men hanteerde hadden nog niet het abstracte karakter van de moderne tijd, maar drukten de geestelijke oorsprong der dingen uit. Een zeer belangrijk voorbeeld van een religieus-wetenschappelijk concept was het oude griekse idee van de vier elementen. Zowel in medische als in natuurwetenschappelijke kringen nam dit gezichtspunt een belangrijke plaats in. Zo voert Cusanus in zijn boekje *Der Laie über Versuche mit der Waage* het gewicht van stoffen terug op de verhouding van de vier elementen en de kosmos, daarbij steunend op het gedachtengoed van Aristoteles, terwijl hij in hetzelfde boekje zeer moderne gezichtspunten brengt. De voorliefde van de middeleeuwse mens de natuur in het licht van dergelijke concepten te beschouwen, moet ook in samenhang worden gezien met de geringe waarde die men hechtte aan de feitelijke waarneming. Zo is een briefwisseling bewaard gebleven van geleerden die van mening verschilden over de vraag of een paardengebit hoektanden bevat. Men putte zich uit in theoretische beschouwingen, liever dan daadwerkelijk een paardengebit te bekijken.

Met de komst van mensen als Galileï en Bacon (1561 - 1626) wordt een nieuw tijdperk ingeluid, waarbij de aandacht in de eerste plaats uitgaat naar de feiten: het empirisme ontstaat. De wijze waarop men zich op de

zintuiglijke waarneming richtte had een sterk kwantitatieve signatuur. Galileï nam hierin zeer duidelijk stelling: "Meet alles wat meetbaar is en maak meetbaar wat zich nog aan het meten onttrekt." Bacon's denken had een moralistische inslag. Hij beleefde de natuur als een vijandige, ver van de mens staande entiteit. De natuur moest op de pijnbank en door foltering ertoe worden geprest haar geheimen prijs te geven. Vandaar zijn voorkeur voor een analytische aanpak.

In het verlengde van het meten zocht men naar een wiskundige beschrijving van de wetmatigheden. De religieuze concepten uit de middeleeuwen maakten langzaam plaats voor mechanistische modellen. Tegelijkertijd ontstond een strenge scheiding tussen wetenschap en religie. In de levensloop van wetenschappers als Newton en Pascal (1623- 1662) voltrok deze scheiding zich zeer nadrukkelijk. Pascal was tot zijn 31e wetenschappelijk actief en trekt zich daarna terug in een klooster en houdt zich dan alleen nog bezig met filosofische en theologische problemen.

5.4 Galileo Galileï

5.4.1 Levensloop

Toen Galileï 17 jaar oud was begon hij, aangezet door zijn vader, een medische studie te Pisa om later van een goede inkomstenbron verzekerd te zijn en zijn familie te kunnen onderhouden. Hij kon echter niet uit de voeten met de wijze waarop vanuit eeuwenoude opvattingen zoals de elementenleer wetenschap werd beoefend. Op bezoek bij de hertog van Florence hoort hij de wiskundige Ricci doceren en vraagt of hij bij hem les kan krijgen. Zo ontwaakt zijn interesse voor de wis- en natuurkunde. Al snel raakt Galileï met Ricci in discussie over de aan Aristoteles toegeschreven stelling dat een zwaar voorwerp sneller valt dan een licht. Een proef met metalen kogels op de marmeren binnenplaats van de universiteit gaf hem onvoldoende uitsluitsel en was nauwelijks geschikt om de toch al slechte betrekkingen tussen hem en de universiteitsleiding te verbeteren. Tijdens een mis in de kathedraal te Pisa, zo gaat de overlevering, zag hij een kroonluchter slingeren. Er ging hem een licht op: kon het slingeren niet gezien worden als een telkens hernieuwd vallen? Kon met behulp van een slinger niet nagegaan worden of een zwaar en een licht voorwerp even snel vallen, zoals hij stellig vermoedde? Hij nam de proef op de som, toonde zijn gelijk aan en ontwikkelde al doende de slingerwetten.

Als Ricci met pensioen gaat weet hij voor Galileï te bemiddelen dat deze de vrijgekomen vacature kan gaan vervullen. Galileï was twee jaar eerder van de medische faculteit gestuurd en zijn collega's zagen hem

ongaarne komen. In deze jaren voert Galileï met hulp van een trouw groepje studenten talloze experimenten uit, die vooral het vallen betreffen. Hij laat kogels vallen van de scheve toren van Pisa en gebruikt een scheef opgestelde houten goot om het vallen te vertragen en zo tot nauwkeurige metingen te komen. Tijdens een bezoek aan de hertog legt deze hem een ontwerp van een baggermolen voor van de hand van zijn broer. Galileï windt er geen doekjes om en zegt dat de machine nooit bagger zal halen. Als de broer van de hertog dit ter ore komt, zorgt deze ervoor dat Galileï's leven op de universiteit zo zuur gemaakt wordt dat hij ontslag neemt.

Te Padua vindt Galileï zijn volgende arbeidsplaats. Padua, gelegen in de vrijstaat Venetië, was vrij van roomse invloed. Hier treft hij meer openheid aan tegenover zijn ideeën. Hij werkt er gedurende een periode van twintig jaar op vruchtbare wijze. Bij monde van een vaag gerucht verneemt hij van de uitvinding van de verrekijker en vindt zelf een eigen kijker uit. Hiermee ontdekt hij bergen en dalen op de maan en hij maakt een schatting van hun hoogte, de ringen van Saturnus, de fasen van Venus en vier manen rond Jupiter. Al deze ontdekkingen stonden in schril contrast met de toen gebruikelijke visie op de kosmos, het geocentrische wereldbeeld, dat al door de grieken werd ontwikkeld. Voor hen behoorden de planetenbanen tot het goddelijke, het volmaakte. Dit hield ook in dat de planeten bewogen volgens cirkels, de wiskundig meest volmaakte vorm en dat de planeten zelf volmaakt bolvormig zouden zijn. Dat niet alleen de aarde maar ook een planeet als Jupiter een maan of zelfs vier manen zou hebben paste niet in dit beeld. Galileï werd vanaf dit moment actief aanhanger van het heliocentrische wereldbeeld van Copernicus.

Rond deze tijd keert Galileï terug naar Florence als wiskundige aan het hof van hertog Cosimo de Medici en stelt zich hiermee bloot aan de invloed van de roomse kerk. In de jaren daarop wordt er in diverse preken op de ketterse invloed van zijn werk gezinspeeld. Als reactie hierop publiceert Galileï verschillende vlugschriften die met vlijmscherpe argumenten de tegenstanders belachelijk maken. Hiermee weet hij veel mensen voor zijn ideeën te winnen, maar strijkt hij anderen tegen de haren in. Meermalen trekt hij naar Rome om de paus voor zijn ideeën te winnen. Van kardinaal Ballarnimo krijgt hij het advies zijn ideeën alleen als hypothese te brengen. Althans dit is de versie van de gebeurtenissen die Galileï in omloop brengt. Bellarnimo beweert later dat hij hem in het geheel niet had toegestaan tot publicatie over te gaan.

In de tien jaar die volgen schrijft hij het boek *Dialogo*. Na het uitkomen hiervan herkent de paus zichzelf in sommige uitspraken van Simplicius, de figuur in het boek die op naïeve wijze de traditionele opvattingen verdedigt. Nu is het hek van de dam. Ondanks zijn rheuma en het feit dat de pest heerst in het gebied tussen Rome en Florence, wordt Galileï gemaand

voor de inquisitie te verschijnen. Een mogelijk vals document duikt op, waaruit zou blijken dat Galileï in bijzijn van getuigen aan Bellarnimo zou hebben beloofd op geen enkele wijze zijn ideeën te zullen verkondigen. Zo wordt hij gedwongen te kiezen tussen de brandstapel of het afzweren van zijn ideeën. Hij kiest voor het laatste en krijgt huisarrest in een villa in de bergen rond Florence.

Maar Galileï zou zichzelf niet zijn gebleven als hij niet een troef achter de hand had gehouden. Hij schrijft een volgend boek *Discorsi*, wetenschappelijk gezien zijn waardevolste werk, dat hij zendt naar een bevriend bisschop. Hij schrijft dat hij een beoordeling verlangt om zijn geweten te ontlasten en vraagt of dit werk in overeenstemming is met de heilige kerk. Maar Galileï laat het boek onderweg roven en in Holland drukken. Iedereen beseft dat dit doorgestoken kaart is, maar hij lacht in zijn vuist.

En zo brengt Galileï zijn nieuwe ideeën in de wereld met een slimme, slinkse streek, zodat de kerk buiten spel wordt gezet. Toch was hij een gelovig mens en gevoelig voor het gezag van de kerk. Hiermee brengt hij het tijdsgewricht in beeld: de mens verliest de verbinding met het goddelijke, maar ontwaakt voor het aardse bewustzijn.

5.4.2 Galileï's experimenten en zijn verbindende denken

Enkele van Galileï's experimenten lenen zich voor demonstratie tijdens de les. Hierdoor haalt men de historische figuur van Galileï voor de leerlingen dichterbij. Zijn experimentele methode is soms heel verrassend en heeft een grote didactische waarde. Dit geldt vooral voor zijn valproeven. Zijn metingen aan vallende kogels van de scheve toren van Pisa maakten hem wel duidelijk dat ongelijke gewichten even snel vallen, maar waren te onnauwkeurig om te kunnen leiden tot een wiskundige valwet. Galileï kwam tot de gedachte de valbeweging te vertragen door een kogel van een schuine helling te laten rollen. "Op een houten balk, ongeveer 12 el lang, een halve el breed en drie vingerdikten dik, maakte men in de smalle kant een gootje, iets meer dan een vinger breed; wij maakten de goot geheel recht ... en wij rolden een harde, gladde en goed ronde bal erover. De balk lieten wij hellen door het ene uiteinde een of twee el boven het horizontale vlak te heffen ... Om de tijd te meten gebruikten we een groot vat water, hooggeplaatst; aan de bodem van dit vat was een buis gesoldeerd met kleine diameter; deze gaf een dunne straal water, die we opvingen in een glaasje tijdens iedere val over de hele lengte van het kanaal of een deel ervan; het zo verzamelde water werd na iedere val gewogen op een zeer nauwkeurige weegschaal."

In de les kunnen we in plaats van een houten goot bijvoorbeeld een aluminiumprofiel gebruiken en men kan een kraan constant laten stromen en

het water tijdens het vallen opvangen in een bekerglas. Het gewicht van het water als tijdmeting kan tot een nauwkeuriger resultaat leiden dan met de stopwatch. Op de bekende wijze kan men nu aantonen dat de valweg evenredig is met het kwadraat van de valtijd.

Het is voor leerlingen vaak verrassend hoe Galileï fenomenen met elkaar weet te verbinden. Aangezet door twijfel omtrent de vermeende stelling van Aristoteles dat een zwaar voorwerp sneller valt dan een licht, kwam Galileï ertoe de slingerbeweging te beschouwen als een telkens hernieuwd vallen. Toen het experiment opleverde dat een zwaar en een licht voorwerp even snel slingeren, was dit voor hem tevens het bewijs dat ze even snel vallen. De gedachte de loodrechte val te vertragen door gebruik te maken van een schuine helling was wellicht meer voor de hand liggend, maar toch bijzonder praktisch gevonden. Fraai is ook hoe hij met een gedachtenexperiment de onjuistheid van de stelling van Aristoteles aantoonde.

Stellen we ons voor, aldus Galileï, dat Aristoteles gelijk heeft met zijn bewering en verbinden we in gedachten een zwaar en een licht voorwerp met een touw, dan kunnen we twee redeneringen volgen:

1. Het lichte voorwerp valt op zichzelf gezien langzamer en zal het zware dus afremmen, zodat de combinatie langzamer valt dan het zware alleen.
2. De voorwerpen zijn samen zwaarder en vallen dus sneller.

Deze conclusies spreken elkaar tegen. Dit kan slechts betekenen dat de voorafaanname niet klopt. Tot zover Galileï.

We kunnen nu nog een stap verder gaan. Nemen we aan dat een lichter voorwerp juist sneller valt dan een zwaar, dan ontstaat ook tegenstrijdigheid; wanneer we hetzelfde gedachtenexperiment toepassen:

1. Het lichte voorwerp zal de zware willen doen versnellen, zodat de combinatie sneller valt dan de zware alleen.
2. Samen zijn de voorwerpen zwaarder dan het zware voorwerp alleen, zodat de combinatie dus langzamer zal moeten vallen dan het zware alleen.

We merken nu dat er slechts één mogelijkheid overblijft: een zwaar en een licht voorwerp vallen even snel!

Zo'n denkexercitie vindt een 10e klasser indrukwekkend. Zolang we geheel vanuit foronomisch gezichtspunt werken, blijken we de kwestie geheel in de voorstelling te kunnen oplossen. De leerlingen kunnen beleven dat "gewoon gezond verstand" grond onder de voeten verschaft. Galileï's wijze van denken helpt de leerlingen op weg om met hun verstand de aardse werkelijkheid te veroveren.

Volgens moderne opvattingen heeft Aristoteles nooit beweerd dat een zwaarder voorwerp sneller valt, maar werden zijn uitspraken verkeerd vertaald. In nederlandse termen zou hij hebben gezegd, dat een zwaarder voorwerp harder (neer)valt.

5.5 Nicolaas Cusanus

5.5.1 Leven en werk

Hoewel Cusanus in de vorige eeuw geheel in de vergetelheid geraakte, is de belangstelling voor zijn werk tijdens deze eeuw sterk herleefd. Störig zegt in zijn *Geschiedenis van de filosofie* het volgende: "Geheel aan het begin van dit tijdvak leeft de voornaamste wijsgeer van de vroege Renaissance, die in geniale intuïtie in zijn werk reeds veel heeft neergelegd, dat pas na hem door de grote natuuronderzoekers op grond van nieuwe waarnemingen als exacte theorie is geformuleerd. In zijn gedachten zijn zoveel kiemen van de moderne geestelijke ontwikkeling vervat, dat hij door velen als de eigenlijke grondlegger van de nieuwere filosofie wordt beschouwd."

Nicolaas Cusanus kan worden gezien als een mens die het huidige tijdperk van de bewustzijnsziel vooruitleefde. Dit tijdperk karakteriseert Steiner als de fase in de mensheidsontwikkeling, waarin de mens als denkend wezen geheel zelfstandig wordt en daarmee de verantwoordelijkheid krijgt met goed en kwaad te leren omgaan, niet in de betekenis van starre dogma's, maar van in elke nieuwe situatie actuele realiteiten. Cusanus was een sociaal bewogen mens, die de rooms-katholieke kerk van binnenuit trachtte te vernieuwen. Hij probeerde het gevaar van de verovering van het grieks-orthodoxe gebied door de turken af te wenden door de kloof tussen verstand en gemoed, die gaapte tussen het rooms-katholieke en het grieks-orthodoxe geloof, te overbruggen. Op wetenschappelijk gebied liep zijn wijze van denken vooruit op de fenomenologie. Als wiskundige doen zijn denkbeelden sterk denken aan de pas na 1800 ontwikkelde projectieve meetkunde (zie deel I, hoofdstuk 4.9.6). Maar in de eerste plaats was Cusanus een mens die al deze werkzaamheden met elkaar wist te verbinden, zodat zij elkaar konden bevruchten. Bij hem vormden religieus en wetenschappelijk denken een geheel.

De behandeling van Galileï sluit zeer concreet aan bij de ontwikkelingsfase van de 10e klasser. Dit ligt bij Cusanus anders. Zoals Cusanus een tijdperk vooruit leefde, zo werpt de behandeling van zijn leven en werk voor de leerlingen een licht vooruit op hun volwassenheid. Men sluit aan bij een verborgen onderstroom van ontwikkeling bij de leerlingen en hun verlangen

naar universeel mens te zijn. De wijze van behandeling luistert daarom zeer nauw, omdat het gevaar bestaat dat men met de biografie van Cusanus over de hoofden van de leerlingen heen werkt. Het juiste evenwicht kan hier worden bereikt door af te stemmen op de al dan niet uitgesproken behoeften van de klas.

Nicolaas Cusanus werd in 1402 geboren in het plaatsje Kues aan de Moezel, waar zijn vader een schippersbestaan leidde. Toen hij 12 jaar oud was betrapte deze hem voor de zoveelste maal met de neus in de boeken en gaf hem een slag met een roeispaan. Voor Nicolaas was dit de aanleiding om weg te lopen naar een in de nabijheid wonende graaf. Deze wist er voor te zorgen dat hij op een school van de Broeders des gemenen levens te Deventer terecht kon komen. Deze broederschap streefde, in tegenstelling tot de kloostergemeenschappen in die tijd, het evenwicht na "ora et labora", in die zin dat zij met hun werk in het volle leven stonden - zij waren pedagogen, timmerlieden en ziekenverzorgers - terwijl zij zich dagelijks terug trokken in meditatie en gebed. Nicolaas blijft drie jaar op deze school. Bekend is de indruk die een schilderij van een "godshoofd" in deze tijd op hem maakte. Dit schilderij was zo gemaakt dat het oog, het oog van God, voor het gevoel van de beschouwer elke kant op keek, daarmee de alomtegenwoordigheid van God symboliserend. Voor Nicolaas was het een fascinerend raadsel, dat iets plats ruimtelijk kon werken.

In zijn vijftiende levensjaar verlaat Nicolaas de broederschap en wordt een rondtrekkende student. Hij studeert natuurwetenschappen en kerkelijk recht. Als hij rond zijn 21e is afgestudeerd, krijgt hij een goede baan aangeboden als advocaat voor het bisdom Trier. Zijn bedje lijkt gespreid. Maar voor de derde maal in zijn leven neemt Cusanus een besluit, waardoor zijn biografie een wending neemt. Hij geeft zijn beroep van advocaat op en doet daarmee afstand van zijn inkomsten en gaat opnieuw studeren, namelijk theologie. Nog tijdens zijn studie wordt hij uitverkozen om deel te nemen aan het belangrijke concilie te Bazel over een geschil. De onfeilbaarheid van de paus wordt ter discussie gesteld. Spoedig wordt Cusanus woordvoerder van de groep, die er voor pleit dat de pauselijke besluiten samen met een quorum van kardinalen worden genomen. Van lieverlede wordt hem echter duidelijk dat de partijen onverzoenbaar tegenover elkaar staan en dat dit gegeven zal kunnen leiden tot een breuk in de kerk. Om dit te voorkomen treedt hij terug en schaart zich achter de paus. Deze geeft hem hierop de belangrijke vertrouwenstaak om als gezant het door de turken bedreigde Constantinopel te bezoeken, zetel van de oosters-orthodoxe kerk.

Aan de gelovigen in Constantinopel beleeft Cusanus de waarde van het geloven met het hart en beseft hij hoezeer de gevoelsweg van de oosters-orthodoxe kerk en de verstandelijke invalshoek van de roomse kerk elkaar

kunnen aanvullen en bevruchten. Hij neemt het besluit in Rome voor het bedreigde gebied te pleiten. Op weg naar Italië ontwikkelt hij zijn gedachte van de "docta ignorantia", de wetende onwetende. Zoekend naar een weg om de kloof tussen verstand en gevoel, tussen oost en west, te overbruggen, komt hij tot het inzicht dat schijnbaar tegengestelde delen in een omvattende eenheid samenvallen, als men het denken tot aan de grens van het voorstelbare brengt. Mogelijk is het vallen van een voorwerp in het water de aanleiding geweest de ontstane cirkelvormige golven in de gedachte te laten uitgroeien tot een cirkel met een oneindige straal en kromte nul. Op dit punt gekomen blijken de tegengestelde elementen lijn en cirkel samen te vallen.

Terug in Rome onderneemt Cusanus een grote reis door Europa. In preken en gesprekken ijvert hij ervoor de dreigende kloof tussen paus- en antipausgezinden te dichten door vernieuwingen voor te stellen als het invoeren van de landstaal in de mis. In 1450 heeft hij een beslissende ontmoeting met een ogenschijnlijk eenvoudige leek, een lepelsnijder, die hij op de markt in Rome ontmoet. In een aantal gesprekken ervaart Cusanus dat deze leek qua boekenkennis dan onwetend mag zijn, maar over een veel diepere kennis beschikt van geestelijke oorsprong. Hier leert Cusanus dat hij niet meer vertrouwen kan op de overgeleverde, traditionele kennis, maar dat "die Weisheit auf den Plätzen und in den Gassen ruft; und es ergeht der Ruf von ihr, dass sie selbst in den höchsten Höhen wohnt". Na deze ontmoeting schrijft Cusanus vier boeken over deze "gesprekken met een leek". In één van deze delen, *Der Laie über die Versuche mit der Waage*, schrijft hij over het wegen, meten en experimenteren, als basis voor de natuurwetenschap en de medische studie. Hij toont bijvoorbeeld aan dat de soortelijke gewicht van het bloed van een zieke gemiddeld groter is dan van een gezond mens.

Een derde doorslaggevende gebeurtenis vindt plaats als Cusanus in 1453 de val van Constantinopel verneemt en de gruwelijke wijze waarop deze stad, die hij lief had, ten offer viel aan de turken onder aanvoering van sultan Mohamed II. Hij krijgt een visioen, waarin hij gestorvenen in een hemels concilie verenigd ziet. Terwijl op aarde oorlog en religieuze intolerantie hoogtij vieren, beleeft hij voor een ogenblik het kosmische tegenbeeld daarvan.

In 1458 bestijgt Pius II de pauselijke troon, een persoonlijke vriend van Cusanus, wiens levensdoel het werd het door de turken veroverde Constantinopel te heroveren. Daartoe roept hij op tot een kruistocht. Cusanus erkent de irrealiteit van dit plan, maar steunt hem trouw. Eind juni 1464 verlaat Cusanus Rome om de kruisridders te verzamelen. Dan wordt hij plotseling ziek en sterft. Naar testamentaire beschikking wordt zijn lichaam in Rome en zijn hart in Kues begraven. Zo rust zijn lichaam in Italië en zijn hart in Duitsland, een symbool voor zijn streven twee werelden te verbinden, zuiden en noorden, oosten en westen, het aardse en het geestelijke.

5.5.2 Sociaal streven en kennisleer

Het levensthema van Cusanus was: tegenstellingen overbruggen vanuit een hoger, geestelijk standpunt. Dit streven uit zich zowel op wetenschappelijk als op sociaal gebied. Juist deze combinatie is interessant voor een 10e klasser. Aan enkele van zijn wiskundige ideeën kan de 10e klasser schoonheid beleven, terwijl het sociale streven van Cusanus enthousiasme wekt om zelf actief te worden. Dat een heldere gedachte door een mens als Cusanus tot werkelijkheid gemaakt wordt, dat het wetenschappelijke en sociale gebied door Cusanus verbonden worden, kan een stralend voorbeeld voor deze leeftijd zijn.

Het thema van het overbruggen van tegengestelden licht in de biografie van Cusanus voor het eerst op bij het aanschouwen van het "godshoofd", het schilderij dat vermoedelijk in de refter bij de Broeders des gemenen levens hing. Hij wordt getroffen door de mogelijkheid de tegenstelling tussen het platte vlak van een schilderij en de ruimtelijke werking ervan te overbruggen. Hetzelfde thema vindt men terug in zijn streven tot vernieuwingen in de kerk en zijn intentie daarbij de kloof tussen geloofsbeleving vanuit het gevoel en het verstand en tussen vernieuwing en traditie te overwinnen.

Op wetenschappelijk terrein wordt dit levensthema het duidelijkste in de wiskundige beelden zichtbaar, die hij in zijn boek "Coincidentia oppositorum" ontwikkelt. Een voorbeeld zal hier nader worden uitgewerkt. Een gestrekte hoek kan worden verdeeld in een hoek α en ß. Maakt men hoek α groter, dan wordt hoek ß dienovereenkomstig kleiner. Uiteindelijk vallen de maximale hoek α en de minimale hoek ß samen in de lijn AB. Uit de ene lijn, de eenheid, kan een veelheid van hoeken ontwikkeld worden. De eenheid omvat deze veelheid, omdat zij deze in potentie bevat en uit eigen kracht en activiteit ontwikkelen kan. De lijn rust in zichzelf, maar is toch bewegingsprincipe.

Op deze manier wist Cusanus de tegenstelling tussen de scherpe en stompe hoek te overbruggen. Cusanus vergelijkt deze situatie met de dynamiek van het denken. Ook het denken rust in zichzelf, maar er kan beweging uit voortkomen. "Het is de pijl op de gespannen boog, rustend, maar op het punt staand de vleugel van de gans, het wezen, het idee, te treffen."

Ekkehard Meffert wijst er in zijn boek *Nikolaus von Kues* op dat de kennisleer, die Cusanus in zijn boek *Idiota de Mente* ontwikkelt, hem tot voorloper maakt van de fenomenologie. Men zal in een tiende klas niet gauw geneigd zijn kennistheorieën te behandelen, hoewel de kennisleer van Cusanus zeer tot de verbeelding spreekt. Voor een ieder die zich wil

verdiepen in de ontstaansgeschiedenis van de fenomenologie vormt zijn kennisleer een belangrijk hoofdstuk. Cusanus onderscheidt vier stappen in zijn kennisweg: waarneming, voorstelling, begrip-verstand, inzicht.

1. Zintuigleer
Cusanus beschrijft dat bij het waarnemen "levensgeest", een fijne stoffelijkheid die onze aderen doorstroomt, via onze zintuigen uitstrooit in de wereld en daar wordt teruggestoten. Hij veronderstelt dat deze levensgeest in staat is het beeld van het verschijnsel na te bootsen. Het geestelijk oerbeeld van het verschijnsel straalt terug in het zintuigbeeld. Voor Cusanus is het waarnemen een actief proces; net als de moderne zintuigleer stelt hij de intentionaliteit van de waarneming voorop.

2. Voorstelling
Cusanus beschouwt de voorstelling als een zelfstandige tussenstap tussen de zintuiglijke ervaring en het verstandelijke functioneren. Het voorstellingsvermogen ziet hij als een orgaan, dat met behulp van levensgeest de zintuigbeelden in het innerlijk na kan scheppen, ook in afwezigheid van de zintuigindrukken. Daarbij verenigt het voorstellingsbeeld de beelden van de verschillende zintuigen. Voorstellen is scheppend, ordenend en bewarend. Maar de voorstelling is volgens Cusanus niet selecterend, vele toestanden worden ononderscheiden waargenomen. Onderscheiding geschiedt eerst door het verstand.

3. Het begrip-verstand
Door de zintuigindrukken en onze voorstellingen wordt onze verstandelijke activiteit gewekt. Het verstand onderscheidt binnen het geheel van voorstellingen en benoemt op grond van overeenstemming en onderscheiding. Het is daarmee in staat (een aspect van) het verschijnsel als abstractie te zien en wordt daardoor transparant voor het oerbeeld in het verschijnsel. Het begrip dat zo ontstaat is echter beperkt door zijn logica en formaliteit. Het is veranderbaar en deelbaar en kan daardoor nooit de eeuwige zijnstoestand van het oerbeeld, het wezen der dingen, uitdrukken.

4. Het inzicht
Het inzicht ziet Cusanus als het schouwen van het oerbeeld in het verschijnsel. Hij vergelijkt het verstand met het lezen in een boek, voor zover letters en woorden onderscheiden worden. Maar het inzicht voegt dit alles tezamen, het verstaat de zin, het is de eenheid, die de wortel vormt van het verstand. Het is het synthetische, wezensaanschouwend denken. Een beeld van dit denken beschrijft Cusanus in zijn *Coincidentia Oppositorium*.

Het gehele kennisproces zag Cusanus als een twee-richtingen verkeer. Van het verschijnsel gaat de *waarnemingsweg* uit, die via de zintuigen en de voorstellingen tot begrip leiden en uitmondt in het schouwen van het oerbeeld in de geest. De *denkweg* reikt vanuit de geest via het verstand, de voorstellingen en de zintuigen naar het oerbeeld in het verschijnsel en geeft daardoor richting aan de waarnemingsweg.

We merken op hoe nauw zijn zienswijze op het punt van het wezensaanschouwend denken verwant is met Goethes "anschauende Urteilskraft"*. Net als Goethe legt Cusanus de beperkende factor op weg naar kennis bij het verstand en niet bij de zintuigen. De logica en formaliteit van het verstandelijke functioneren beperken het oordeel of, zoals Goethe het uitdrukt: "Die Sinne trügen nicht, aber das Urteil." Behalve deze overeenkomsten tussen de beide kennisleren kunnen we ook een belangrijk verschil waarnemen. Cusanus wil de beperkingen van verstand overwinnen door op te stijgen tot het omvattende niveau van het inzicht. Getuige zijn *Coincidentia Oppositorium* bedoelt hij met het inzicht het niveau van beweeglijke begrippen die een grote potentie, in de zin van Aristoteles, in zich dragen. Goethe tracht dit te bereiken door het bewegingselement al vanaf het begin in te bouwen: gevarieerd waarnemen, het verschijnsel als proces zien, het grondgebaar van het verschijnsel gaan zien zijn de voorstadia van de wezensontmoeting. De volle rijkdom van de geestelijke dimensie in het verschijnsel wordt op elk niveau gezocht. Hoewel Cusanus wel raakte aan deze dimensie lag bij hem het accent tussen de waarnemingsweg en de denkweg op de eerste plaats. Hij bouwt een piramide vanuit de waarneming. Het inzicht waar hij toekomt is als een gouden bal die balanceert op de top. Bij Goethe doordringen de piramides van de waarneming en de denkweg elkaar gelijkwaardig:

Het leven en werk van Galileï zijn voor een 10e klas zeer toegankelijk. Zoals eerder gezegd is dat bij Cusanus minder het geval. Toch is in de praktijk gebleken dat de behandeling van zijn biografie en zijn werk van grote waarde is, hoewel men per klas goed moet kijken welke elementen aansluiten. In de praktijk is het heel werkzaam gebleken eerst de biografie te vertellen, waarbij men al kan merken welke aspecten in zijn werk aanspreken en die men dan wat meer kan uitbouwen.

Cusanus is een mens waar een 10e klasser in morele zin naar op kan zien. Hij verliest zichzelf niet als een Galileï in enkele activiteiten, maar werkt omvattend, vanuit grote thema's. In een 10e klas, een leeftijd waarbij het oordelen zich begint te ontwikkelen, kan het bijvoorbeeld veel indruk maken dat een mens een leven lang met het overbruggen van tegenstellingen

* Zie hierover ook deel 1, hoofdstuk 3.2.

is bezig geweest en dat niet alleen in filosofische zin. Bij Cusanus bevruchtte een eenmaal verkregen inzicht zijn sociale handelen. Toen hij eenmaal inzag dat tegenstellingen overbrugd kùnnen worden, ijverde hij zijn verdere leven ervoor op sociaal gebied kloven te dichten.

De meer filosofische thema's die in het werk van Cusanus te vinden zijn kunnen alleen in klassen worden behandeld die een meer beschouwelijke instelling hebben. Een korte introductie kan wel een goede bodem leggen voor een diepergaande beschouwing in klas 11. De behandeling van het wiskundige voorbeeld uit de *Coincidentia oppositorium* is voor 10e klassers vaak fascinerend. De behandeling van zijn zintuigleer zal alleen in een klas aanslaan met een filosofische interesse.

INHOUDSOPGAVE 11e KLAS

1. Inleiding 125
   1.1 Natuurkunde in de 11e klas 125
   1.2 Periode-opbouw en methodiek 126

2. Voorbeeld van de behandeling van elektriceit in de pedagogische praktijk 131

3. Begrips- en ideeënvorming rond de lesstof 144
   3.1 Oerfenomenen van het statische elektrische en statische magnetische veld 144
   3.2 Magnetisme 153
   3.3 De gesloten elektrische kring 156
   3.4 De vonk en de vonkenzender 160
   3.5 Elektromagnetische fenomenen in gas- en vacuümbuizen 165
   3.6 Inductie en zelfinductie 178
   3.7 Spoel en condensator 180
   3.8 Zender en ontvanger 190

4. Toepassingen 193
   4.1 Toepassingen van de gas- en vacuümbuizen 193
   4.2 Digitale techniek 197
   4.3 Halfgeleider techniek 199
   4.4 Telecommunicatie 200

5. Ideeënvorming en achtergronden voor de docent 204
   5.1 De natuurwetenschappelijke methode 204
   5.2 Het atoommodel 208
   5.3 Begripsverruiming 210
   5.4 Natuur en geest 212
   5.5 De dynamiek van de gesloten kring in relatie tot de ruimte en de mens 213
   5.6 Toestand contra stroming 215
   5.7 Bijzonderheden over het magnetisme 217
   5.8 Fenomeen, veld en sfeer 224
   5.9 Eenheid en verval 225
   5.10 Elektromagnetisme en de mens 226
   5.11 Aarde, kosmos en mens 228

1. INLEIDING

1.1 Natuurkunde in de 11e klas

Ook ten aanzien van de 11e klas willen we de aansluiting zoeken van de lesstof met de ontwikkelingsfase van de leerlingen (16-17 jarigen). Als uitgangspunt hiervoor nemen we de vraag hoe een gezonde ontwikkeling van het intellect kan worden bereikt. Rudolf Steiner zegt hierover in een lerarencursus* dat het intellect in de zich reeds ontwikkelende zielestructuur zelf zijn voedingsbodem zou moeten vinden. De mens in ontwikkeling zou datgene moeten denken wat hij voordien reeds gevoeld en gewild heeft. Is er in de voorafgaande jaren van de elfde klas al sprake geweest van intellectueel leren of is er te weinig doorleefd opgenomen door de leerlingen, dan ontstaat interesseloosheid of een gevoelloze kennisdrang. Het intellect komt dan te weinig of te eenzijdig tot ontwikkeling. De beleving van een innerlijke vrijheid, van waaruit men tot inzicht in zichzelf en de wereld kan komen, wordt dan gedoofd. De beleving een geestwezen te zijn met persoonlijke mogelijkheden tot inzicht en ontwikkeling kan op de leeftijd van de 11e klasser ontstaan, wanneer het intellect van buitenaf wordt aangesproken, maar in de eigen ziel de aanleiding vindt om denkend de natuur, de mens en de kosmos te doorgronden.

In de huidige tijd zien we duidelijke tendensen in de richting van interesseloos, op het gemak gericht gebruik van techniek. Aan de ene kant ontstaat er geen verhouding met de apparatuur waarmee omgegaan wordt, terwijl anderzijds de mens steeds meer gegrepen wordt door een liefdeloze begeerte naar kennis. Beide eenzijdigheden beperken de ontwikkeling van datgene waar het eigenlijk om gaat, namelijk dat de mens in zichzelf ontwaakt, zich vindt in zijn eigen zieleontwikkeling en deze tevens stuurt.

In deze tijd loopt de mens het gevaar dat zijn ziel zich ongeïntegreerd ontwikkelt in drie extreme richtingen van:

- de stuurloze wil die zich uit in zinloos geweld of brute seks;
- het leven in en handelen naar gevoelsillusies;
- het liefdeloze wijdsheidszoeken.

De achter deze eenzijdigheden schuil gaande krachten van het willen, voelen en denken moeten zich ontplooien en kunnen niet worden ontlopen, maar de ontwikkeling ervan zal in rechte banen moeten worden geleid. Dit thema kan zich vanaf de puberteit als een nieuw levensprincipe in de ziel gaan manifesteren, wat iets anders is dan een op het ego

* Rudolf Steiner: *Menskunde en opvoeding*.

gerichte overlevings- en geldingsdrang, die er ook moet zijn. Het biedt de mogelijkheid het geestelijke te beleven, de eigen levensweg samen met anderen te vinden en de geldingsdrang om te vormen tot liefde.

In klas 9 t/m 12 wordt de lesstof in toenemende mate op de beschreven ontwikkeling gericht. Zo wordt in de 11e klas in de Parcival-periode de blik gericht op de zoekende, op weg zijnde mens, die door aangeleerde gedragsregels en geldingsdrang heen zijn bestemming vindt. Hij maakt daarbij een reis door alle regionen van de ziel.

Voor de 11e klasser gaat de wereld in zijn wijdheid open, maar ook ongekende diepten en eenzaamheid doen zich gelden. Dit wordt in het leerplan tegemoetgetreden door periodes cartografie, astronomie en Parcival. In de natuurkundeperiode wordt een op Parcivals zoektocht gelijkende reis gemaakt door regionen van de natuur, die nieuw zijn en waar de mens nog geen vaste grond onder de voeten heeft om deze fenomenen te doorgronden en te hanteren. De onderwerpen die aan bod komen zijn elektriciteit, magnetisme en radioactiviteit. Het gaat er niet alleen om de laatste technische ontwikkelingen globaal te bespreken, maar vooral om de leerlingen een begrip en gevoel mee te geven van het wezen van deze natuurkrachten. Wat dit laatste aangaat staan we als leerkrachten ook nog in de kinderschoenen, maar een poging hiertoe zou in alle eerlijkheid toch ondernomen moeten worden. Wanneer de leerkracht zelf zoekende is naar de samenhang tussen natuur en mens, dan werkt dat des te sterker op de leerlingen naarmate de leraar hier intensiever mee bezig is. Een heel mooie, oud-chassidische spreuk geeft dit als volgt weer: "De leraar geeft zijn verleden aan de leerling over de grenzen van diens geboorte, de leerling geeft zijn toekomst aan de leraar over de grenzen van diens dood."

1.2 Periode-opbouw en methodiek

De opzet en indeling van deze periode is meestal sterk afhankelijk van de leerkracht. Vaak wordt de lesstof van de 8e en 9e klas nogmaals behandeld, maar dan systematisch qua opbouw van begrippen. Deze aanpak is dan ook heel wezenlijk voor de 11e klas. Concentreerde de lesstof zich in de 8e en vooral 9e klas rond de technische toepassing, in de 11e klas zou men met de natuurlijke elektrische, magnetische en radioactieve processen kunnen beginnen en hierbij de bespreking van meetmethoden en begripsontwikkeling laten aansluiten. Men kan hierover veel feitenkennis opsommen, maar dan ontstaat het gevaar van interessante maar losstaande kennis. Deze natuurlijke processen zouden dan ook

steeds zo gepresenteerd moeten worden, dat er een samenhangende compositie ontstaat.

Soms wordt door leerkrachten wat de methodiek aangaat een onderscheid gemaakt tussen de analytische en de synthetische werkwijze. Wanneer men natuurfenomenen of techniek gaat bekijken past men als vanzelf de analytische methode toe: men probeert de afzonderlijke delen en basisfenomenen te onderscheiden. Een groot deel van de periode zal synthetisch van aard zijn, wanneer de leerkracht systematisch opbouwend de ene proef na de andere toont, om zodoende de samengestelde fenomenen te onderscheiden. De wetenschapper en de ontwerper/uitvinder volgen meestal tegengestelde wegen. Om nieuwe techniek te ontwikkelen moet de uitvinder/ontwerper de synthetische methode toepassen; zijn vraag is: "Hoe laat ik basisfenomenen op een nieuwe manier samenwerken?" De wetenschapper volgt de analytische methode: hij moet met uitsluiting van alle bijzaken de basis- of oerfenomenen ontdekken. Bij deze methode wordt het fenomeen steeds verder geïsoleerd door het denkend ontwikkelde inzicht; toch blijft het steeds verder geïsoleerde fenomeen in samenhang staan met de totaliteit van verwante verschijnselen. Lukt het echter niet deze samenhang te pakken, dan blijven de geanalyseerde fenomenen als losse onsamenhangende delen naast elkaar staan en kan men de betreffende stof beter eerst voor zichzelf laten rijpen alvorens hem in de klas te behandelen.

	pedagogie/presentatie	*onderzoeker/uitvinder*
synthetische methode	van basisfenomenen tot samengestelde fenomenen	ontwikkelen van nieuwe techniek, wiskundige axiomatische methode
analytische methode	natuurfenomenen en bestaande technieken	vinden van de basis- of de oerfenomenen, wiskundig bewijs

Zoals Goethe zijn kleurenleer opbouwde, zo zou ook deze periode opgebouwd kunnen worden. Hij ging uit van de mens (bijvoorbeeld met de zogenaamde nabeelden) en via de kleurverschijnselen in de mens (bijvoorbeeld de kleuren in troebele media) kwam hij weer terug bij de mens (de morele werking van de kleuren op de mens). Hij begint dus bij de uiterlijke mens en eindigt bij de innerlijke mens. Wanneer deze periode aangevangen wordt met de elektrische, magnetische en radioactieve verschijnselen in mens en natuur, en aansluitend de kunstmatige (technische) elektromagnetische en radioactieve fenomenen beschreven worden, dan komen we via het beschrijven van de gestiek van deze fenomenen

weer terug bij de mens, omdat dit laatste immers een vergelijking met het menselijke inhoudt. Men begint dus bij de uiterlijke mens en gaat via het natuurfenomeen naar het oerfenomeen en vervolgens naar het technisch samengestelde fenomeen, dus steeds verder in de abstractie en gedifferentieerdheid, om vervolgens in de inleefbare en herkenbare gestiek in de eigen ziel houvast te vinden en de fenomenen in enige mate wezenlijk te doorgronden. Deze boog hoeft niet het geheel van de periode te omvatten, maar kan per thema nagestreefd worden.

Bij het elektromagnetisme, maar ook bij de radioactiviteit, is men gedwongen om het denken zo aanschouwelijk mogelijk aan te spreken. Deze fenomenen dwingen de mens om te verinnerlijken. Het modeldenken, dat zo sterk een stempel drukt op dit gebied van de natuurkunde, is hiervan een voorbeeld, omdat dit een zeer sterk beroep doet op het voorstellingsvermogen. Het roept tevens de noodzakelijke verinnerlijking een halt toe, omdat aan de tastwereld ontleende zintuigervaringen in de abstractie worden gevoerd. Een voorbeeld hiervan is het deeltjesbegrip. Veel wordt gesproken over de basiskrachten van de natuur, maar tegelijkertijd wordt de ervaring van deze krachten en het denkend aanschouwen ervan door de gehanteerde methode verhinderd. Een fenomenologische methode die deze weg openhoudt zou ontwikkeld kunnen worden. Zo'n methode krijgt men echter niet cadeau, maar kan alleen ontwikkeld worden wanneer de leerkracht niet alleen verbonden is met zijn werk, maar ook bereid is tot zelfscholing.

Sinds de mens vanaf de ontdekking van de Volta-zuil rond 1800 de elektriciteit praktisch/technisch exploreert, is de bewustwording en ontwikkeling tot wereldburger vrijwel hand in hand gegaan met de elektrotechnische ontwikkelingen. Het wetenschappelijke denken is sterk geënt gebleven op het wiskundig-modelmatig denken. De mens blijft hierdoor in zijn voorstellingen gevangen en kan zich niet verbinden met de werkelijke krachten in deze fenomenen. Voor de verdere ontwikkeling van de mens is van belang, dat twee elkaar complementerende aspecten tot hun recht komen: de "levenskunde" en de "wezenskunde". In het reguliere onderwijs heeft het werken met de levenskunde van de alledaagse toepassing een hoge vlucht genomen, met het accent op de mens als sociaal en economisch wezen. De Vrije Scholen onderschrijven de waarde van dit uitgangspunt, maar zien het als de ene zijde. Ook de in de wezenskunde vervatte morele ontwikkeling van de mens behoeft serieuze aandacht, gezien het appèl dat de technische ontwikkelingen doen op ethische overwegingen (kernbommen, chemische oorlogvoering, genetische manipulatie, enz.).

De elektromagnetische fenomenen spreken zich uit in polariteiten. Plus/min en noord/zuid zijn absolute tegenstellingen. Deze tendensen

blijken zich maatschappelijk gezien ook sterker te ontwikkelen, terwijl er tegelijkertijd verlangd wordt naar vrede en eenheid. Tegenstellingen die het maatschappelijke leven uithollen zijn bijvoorbeeld ideologie en macht, of begeerte en genot. In de begeerte wordt alles op alles gesteld om deze te bevredigen en de eventueel blijvende bevrediging veilig te stellen. In het genot wordt de omgeving vergeten. Dit kan zover gaan dat men opgaat in een roes van onafhankelijkheid of onverantwoord gedrag. Het zal blijken dat de elektromagnetische techniek en genoemde maatschappelijke ontwikkelingen een overeenkomstige signatuur hebben. Wanneer men deze thematiek ook een plaats in de periode kan geven, is men weer bij de mens aangeland en heeft men een methodische weg gegaan, die integratie in plaats van polarisatie teweeg brengt. Hygiënisch voor de tegenwoordige zieleontwikkeling lijkt ons om de grootste polariteiten te integreren en er zelf als leidsman midden in te staan. Omdat deze periode de leerlingen in extreme polariteiten kan voeren, kan een geëigende behandeling hiervan bijdragen aan de psychische ontwikkeling van de leerlingen.

De tekst is als volgt opgebouwd. In hoofdstuk 2 wordt aan de hand van een exemplarische waarnemings- en begripsopbouw duidelijk gemaakt hoe men in een 11e klas het onderwerp elektriciteit zou kunnen behandelen in de concrete lessituatie. In hoofdstuk 3 worden verschillende deelthema's systematisch uitgewerkt. De deelthema's zijn daarbij zo in paragrafen gerangschikt, dat een rode draad wordt gevolgd die leidt van de elektrische en magnetische oerfenomenen naar de principes van zender en ontvanger. In hoofdstuk 4 volgen dan enkele toepassingen, waarna in het afsluitende hoofdstuk 5 ideeën en gezichtspunten gegeven worden die voor de docent als achtergrond kunnen dienen en tot eigen onderzoek kunnen aanzetten.

Opgemerkt moet nog worden dat de omvang van dit boek dwong tot selectie. Een aantal thema's die in deze periode thuishoren, zoals de radioactieve verschijnselen, de halfgeleiders, het foto-electrische effect en de electrische en magnetische verschijnselen in de natuur, komen daardoor niet aan bod. Ook de electrische verschijnselen in vloeistoffen worden slechts kort aangestipt.

De elementen van de periode kunnen in de volgende opsomming worden samengevat:

1. elektrische en magnetische fenomenen in mens, natuur en kosmos;
2. basis- of oerfenomeen (elektrisch en magnetisch veld, gesloten kring);
3. samengestelde proeven (spoel en condensator, vonkenzender, telecommunicatie);
4. technische toepassingen (zender, elektronenmicroscoop, t.v., lamp, massaspectrometer, fotocel);

5. gestiek van elektriciteit/magnetisme;
6. maatschappelijke effecten;
7. wetenschapsmethoden (aanzet, een uitbreiding hiervan kan volgen in klas 12);
8. practicum (bijvoorbeeld spoel, condensator, a.m.ontvanger);
9. excursie (kerncentrale, geautomatiseerde productie, montage- of distributiebedrijf).

2. VOORBEELD VAN DE BEHANDELING VAN ELEKTRICITEIT IN DE PEDAGOGISCHE PRAKTIJK

In dit hoofdstuk willen we laten zien langs welk pad een fenomenologische behandeling van elektriciteit kan verlopen in de lespraktijk van een 11e klas. De inhoudelijke invalshoek die hier wordt gevolgd richt zich op de vraag naar de oorsprong van de elektriciteit. Het zoeken naar een antwoord op deze vraag zal ons ertoe brengen de aard van de tegenstelling tussen de elektrische polen in verband te brengen met de tegengestelde eigenschappen van stoffen, die aanleiding zijn voor het ontstaan van elektriciteit. We zullen hiertoe achtereenvolgens de verschijnselen van het ontstaan van statische elektriciteit door wrijving en het vergaan van het elektrisch veld in vonk, rhumkorff en gasbuizen beschouwen.

Pedagogisch gezien betekent dit dat men aansluit bij de sociale verhoudingen die in een 11e klas gewoonlijk heersen. De 11e klasser (16-17 jaar) voelt zich namelijk heen en weer geslingerd tussen de rol die hij in de groep inneemt en zijn streven een persoonlijkheid te worden, die zich in zienswijze en gedrag onderscheidt van klasgenoten. De angst uit de gemeenschap gestoten te worden noopt hem ertoe zich aan te passen aan de groepscode en pint hem vast op de rol die hij in het verleden binnen de groep innam. De individuele impuls die zich op deze leeftijd doet gelden maakt, dat hij juist afstand wil nemen van deze oude rol, als betrof het een oude huid die verwisseld moet worden om ruimte te geven aan innerlijke groei. Kortom, de 11e klasser voelt zich in een spanningsveld staan tussen meebewegen met de groep en vasthouden aan de eigen identiteit. We zullen zien dat dit een parallel vormt met de geaardheid van het elektrische spanningsveld.

Didactisch wordt vooral gewerkt met de socratische methode, het spel van vraag en antwoord. De docent staan twee uiterste wegen open. Hij kan geheel docerend de eigen ideeën brengen, of hij kan zich geheel richten op de leerlingen en aansluiten bij hun mogelijkheden tot inzicht. Hier wordt een combinatie van beide gezocht. De vragen worden zo gesteld dat een van tevoren in grote lijnen uitgestippelde route kan worden gevolgd, een hoofdroute met verschillende mogelijke aftakkingen. De in de lespraktijk gevolgde route zal nog in vele opzichten kunnen verschillen, afhankelijk van de klas en de mogelijkheden van de docent. Dit vereist van de leraar een combinatie van vasthoudendheid en souplesse. Tevens dient de leraar het terrein goed te beheersen, zodat minder adequate bijdragen in de goede richting kunnen worden omgebogen, maar ook eventuele voor de leraar zelf nieuwe gezichtspunten als zodanig kunnen worden herkend en geplaatst in het grote verband. Op deze wijze

vermijdt men het om over de hoofden van de leerlingen heen te werken, activeert men hun denken en bereikt men een betere aansluiting bij de denkwereld van de 11e klasser.

Als startpunt nemen we enkele basale proefjes rondom statische elektriciteit die de leerlingen in veel gevallen al van klas 8 of 9 kennen: het wrijven van platen zoals pvc, glas en perspex in alle mogelijke onderlinge combinaties en het wrijven van een gladde plaat pvc en een met schuurpapier ruw gemaakte pvc-plaat. Steeds stelt men vast welk materiaal positief en welk negatief elektrisch wordt. Als ijkpunt kan men een geëlektriseerde elektroscoop nemen. Plexiglas met pvc gewreven wordt positief, ruw pvc dat met glad pvc wordt gewreven wordt negatief. Bij de galvanische elektriciteit kan men zich beperken tot het met behulp van een gevoelige ampèremeter vaststellen van de polariteit van een combinatie van twee metalen, die men eenvoudig in water doet. Als metalen kiest men dan bijvoorbeeld de onderlinge combinaties van koper, lood en zink. Deze reeks kan men dan vervolgens nog uitbreiden met het zilver of goud van een ring van een van de leerlingen. Een aanvullende proef vormt de concentratiecel. Men neemt hiervoor twee bekerglazen met gelijke metalen elektroden, bijvoorbeeld koper, en water met een oplossing van een zout van het desbetreffende metaal, bijvoorbeeld kopersulfaat, in het ene bekerglas met een hoge, in het andere met een lage concentratie. De bekerglazen worden verbonden met een slangetje, gevuld met water. Dit levert een spanningsbron op, waarbij de koperen elektrode in het bekerglas met de geconcentreerde oplossing positief en de andere elektrode negatief elektrisch wordt.

De volgende dag* stelt men de vraag: onder welke voorwaarden ontstaat, afgaande op deze verschijnselen, elektriciteit? Al snel zal de klas dan komen op de eerste voorwaarde: zowel bij de statische als bij de galvanische elektriciteit dienen *stoffen met tegengestelde eigenschappen* als uitgangspunt genomen te worden. Na enig doorvragen zullen de leerlingen de activiteit van het wrijven bij de statische elektriciteit en het in water plaatsen bij de galvanische elektriciteit uitleggen als een *verbinden* van de stoffen met tegengestelde eigenschappen, wat als tweede voorwaarde kan worden aangemerkt. Beide voorwaarden behoeven een nadere uitwerking.

* De lesstof wordt gegeven in periodes (zie deel I).

1. Stoffen met tegengestelde eigenschappen

Bij de opwekking van statische elektriciteit kan men de leerlingen de in de proef gebruikte stoffen eerst in een reeks laten zetten, waarbij de stoffen zó in de reeks worden geplaatst dat bij het wrijven van twee van zulke stoffen de links in de reeks staande stof positief en de rechts in de reeks staande negatief elektrisch wordt:

+ *glas, plexiglas, pvc* -

Nu wordt aan deze reeks een andere toegevoegd van in de natuur voor komende stoffen:

+ *glas, barnsteen, rubber, amorfe zwavel* -

Al gauw wordt opgemerkt dat de eigenschap die van links naar rechts in afnemende mate door deze reeksen vertegenwoordigd wordt de hardheid van het materiaal betreft. Nu kan men de leerlingen zelf laten verwoorden dat bij het wrijven van twee stoffen het hardste materiaal positief en het zachtste negatief elektrisch wordt. Deze conclusie kan nog worden ondersteund door bij de kunststoffen die in de proef werden gebruikt na te gaan, welke stof het hardste en welke het zachtste is. Een plexiglas plaat, die met een pvc plaat gewreven positief elektrisch wordt, kan inderdaad wel in een pvc plaat krassen, terwijl dit andersom niet mogelijk is. Uit het gegeven, dat bij het wrijven van een glad en ruw oppervlak van hetzelfde materiaal het gladde positief en het ruwe negatief elektrisch wordt, blijkt voorts dat behalve de hardheid ook de ruwheid van het materiaal van belang is.

Bij de galvanische elektriciteit kan men uit de proef een vergelijkbare reeks opstellen:

+ *goud, zilver, koper, lood, zink* -

De leerlingen ontdekken meteen dat het hier om de edelheid van de stof gaat. De overeenkomstige conclusie luidt dan ook: worden twee metalen in water gedaan dan zal het edelste metaal positief en het onedelste negatief elektrisch worden. Een aanvulling op deze conclusie kan zijn, de beleving van de eigenschappen edel en onedel bij de leerlingen te versterken door er op te wijzen dat men een gouden ring slechts in koningswater op kan lossen, terwijl een onedel metaal als natrium zo graag en heftig met water reageert, dat het onder olie bewaard moet worden om te voorkomen dat het met het water in de lucht reageert. Een proefje dat dit demonstreert vormt het toevoegen van een stukje natrium aan een dikwandig en hoog bekerglas dat half gevuld is met water. De reactie is zo heftig dat deze met een kleine ontploffing gepaard gaat.

In de concentratiecel heeft men niet met een tegenstelling van een edel en onedel metaal te maken, maar met een half-edel metaal zoals koper, dat in het bekerglas met een lage concentratie kopersulfaat een

grotere neiging heeft in oplossing te willen gaan dan in het bekerglas met een hoge concentratie.

Nu kan men de zaak op een rijtje zetten en aan de leerlingen de vraag voorleggen of de eigenschappen die de positieve ofwel de negatieve elektriciteit opleveren onder één noemer te brengen zijn:

positief	*negatief*
hard	zacht
glad	ruw
edel	onedel
weinig oplossen	sterk oplossen

De leerlingen zullen ervaren dat dit weliswaar mogelijk, maar lastig onder woorden te brengen is. Al heen en weer pratende kan men tot de conclusie komen dat aan de positieve kant de stof zijn vorm wil handhaven, bij het hard of glad in mechanische en bij het edele in chemische zin. Aan de negatieve zijde geeft de stof makkelijk(er) zijn mechanische of chemische vorm op. In de concentratiecel ontstaat de positieve pool waar het koper weinig in oplossing gaat, terwijl dit bij de negatieve pool juist sterk het geval is. Deze abstracte benadering kan men nog uitbreiden door de leerlingen te vragen een beeld te vinden voor dit verschil van eigenschappen. Zo'n beeld is bijvoorbeeld een middeleeuwse koning en zijn nar. De koning vertegenwoordigde in die tijd de onaantastbare macht, de zedelijke norm en sociale code. Hij kon nooit uit zijn rol schieten. De nar was de enige persoon aan het hof die in zijn grappen directe kritiek kon verwerken aan het adres van 's konings besluiten. Hij zorgde voor de sociale bewegingsruimte op het hof.

	positief	*negatief*
eigenschappen:	hard, glad, edel	zacht, ruw, onedel
	weinig oplossen	sterk oplossen
	vormhandhaving	vormbeweeglijkheid
	(koning)	(nar)

2. De verbinding van de stoffen met tegengestelde eigenschappen

Hier kan men aanvangen met de vraag hoe de activiteit van het wrijven zich tot de tegengestelde eigenschappen hard-zacht en glad-ruw verhoudt, evenals de vraag hoe het in water doen zich verhoudt tot de tegengestelde eigenschappen edel-onedel. Dan zullen de leerlingen opmer-

ken dat juist het wrijven de activiteit is die in staat is de tegengestelde eigenschappen op elkaar te betrekken. Iets dergelijks wordt ook bereikt door twee verschillende metalen in water te doen. Juist het water, of nog beter, het zure water is in staat de chemische eigenschappen edel en onedel in een relatie tot elkaar te brengen. Men heeft te maken met eén verschil in eigenschap, dat potentieel tot een werking kan leiden, maar die werking treedt pas op wanneer dit verschil door de verbinding geactualiseerd wordt.

De volgende stap heeft te maken met de aard van de relatie tussen tegengestelde eigenschappen die leidt tot het ontstaan van elektriciteit. Het karakter van deze relatie kan zich voor de leerlingen af gaan tekenen door de vergelijking met andere relaties. Deze relaties worden zó gekozen dat de oorsprong van het ontstaan van elektriciteit zichtbaar wordt. Wij gaan hierbij vooral in op het ontstaan van wrijvingselektriciteit:

a. De polariteit warmte↔verdichting doet stoffen met de relatief tegengestelde eigenschappen zacht-hard ontstaan.
b. Wrijving van een harde en zachte stof doet elektriciteit ontstaan.
c. De elektrische toestand streeft ernaar te vergaan.

Ad a. Allereerst kan men de relatie levitatie en gravitatie ofwel warmte en verdichtingswerking in de natuur in de herinnering brengen zoals deze in achtste en negende klas behandeld werd (zie deel I, 4.5). De warmte doet de stof uitzetten, maakt hem beweeglijk en vormt hem om tot een eenheid. De verdichtingskrachten, die altijd in de stof werkzaam zijn maar de overhand krijgen als de warmte wordt weggenomen, doet de stof inkrimpen en verstarren tot apart naast elkaar staande objecten. De stof is dus het wisselwerkingsveld van deze twee krachten, die in hun tegengestelde maar op hetzelfde gebied gerichte werkzaamheid een polariteit vormen. Elke stof in een bepaalde toestand heeft eigenschappen, die een afspiegeling vormen van de plaats die deze stof op dat moment inneemt binnen de geschetste polariteit. Overheerst de warmte dan ontstaat de gasvorm, overheerst de verdichtingswerking dan neemt de stof de vaste-stofvorm aan. De toestand van de stof is steeds een wordende, bewegend tussen de extremen van de beide polen. Men vraagt de klas net zo lang door tot een zekere verzadiging van dit inzicht is bereikt. De termen die hier zijn gekozen kunnen natuurlijk per klas verschillen.

Ad b. Vervolgens overzien we met de klas het 'landschap' van stoffen die zo ontstaan zijn. Het eigenschappenpaar hard-zacht hangt samen met de geschetste polariteit warmte↔verdichting. We onderzoeken deze samenhang op overeenkomst, verschil en ontwikkeling. De overeenkomst is voor de leerlingen makkelijk te vinden. Zacht en hard vertegenwoordigen

één paar tegengestelde eigenschappen die ontstaan onder invloed van de polariteit warmte↔verdichting. Het verschil laat zich al moeilijker vinden. Warmte en verdichting zijn polair, terwijl de eigenschappen zacht en hard relatief zijn: een stof kan alleen als hard of zacht worden omschreven ten opzichte van een andere stof. Ten slotte zoeken we naar de ontwikkeling die het ontstaan van de relatie zacht-hard inhoudt ten opzichte van de relatie warmte↔verdichting. Het relatieve verschil in hardheid vormt blijkbaar het uitgangspunt voor het ontstaan van statische elektriciteit. De hard- en zachtheid van de twee stoffen staan weliswaar wordend in het krachtenveld van warmte en verdichting, maar vertegenwoordigen in de activiteit van het wrijven een min of meer onveranderlijke, geworden toestand, omdat bij wrijven de eigenschappen hard en zacht namelijk vrijwel ongewijzigd blijven, ook al oefenen de stoffen een zekere werking op elkaar uit. We onderzoeken met de klas waaruit deze werking bestaat. De zachte stof verandert tijdens het wrijven nog het sterkst in vergelijking met de harde stof, hij wordt meer ingedrukt en ondervindt meer slijtage, vooral in die zin dat het oppervlak 'dichtgesmeerd' raakt, terwijl de harde stof voor zover hij aangetast wordt meer neigt tot versplintering. Ook worden veel stoffen, zeker kunststoffen die zich zo goed lenen voor het opwekken van elektriciteit, door druk en wrijving enigszins harder. Bij zachte stoffen is dit weer in wat sterkere mate het geval dan bij harde. De tegenstelling die harde en zachte stoffen vertegenwoordigen, in de zin van vormstar tegenover vormbeweeglijk, wordt dus enigszins vereffend.

Vraagt men de leerlingen naar de andere tegenstellingen die elektriciteit kunnen opwekken, dan zullen zij de vereffening duidelijk herkennen in het geval van het wrijven van een ruwe en een glad gepolijste versie van dezelfde stof. De ruwe wordt bij het wrijven gladder en de gladde iets ruwer. De tegenstellingenparen hard/glad en zacht/ruw vertegenwoordigen dus een bepaalde potentie, kunnen in het wrijven nog tot een zekere werkzaamheid komen en mogen daarom als tegengestelde krachten worden beschouwd, maar zijn als eigenschappen dan wel krachten aan de stof gebonden, waardoor hun wederzijdse invloed op elkaar gering is.

Ook bij de concentratiecel zal de tegenstelling: hoge concentratie kopersulfaat en weinig oplossen van koper tegenover lage concentratie en veel oplossen, zich vereffenen. Bij de galvanische cel vereffent de tegenstelling edel-onedel, ofwel chemisch passief tegenover actief zich in zoverre, dat het onedele metaal een base of zout vormt en daarbij chemisch minder actief wordt. Natronloog dat ontstaat als we natrium in water doen is bijvoorbeeld minder actief dan puur natrium. Steeds zien we dat aan de negatieve pool de stofkwaliteit het sterkst verandert en beweegt in de richting van de stofkwaliteit aan de positieve pool, terwijl de verandering van de stof aan de positieve pool kleiner is. Dit zal de

leerlingen niet verbazen, aangezien we eerder de stofkwaliteiten van de negatieve pool als vormbeweeglijk en die aan de positieve pool als vormstar hebben beschreven:

	vormbeweeglijk		*vereffening*	*vormstar*
wrijven	zacht	→	harder	hard
	ruw	→	gladder	glad
galvanische cel:	onedel	→	passiever	edel
concentratiecel:	lage	→	hogere	hoge concentratie
	negatief			*positief*

Laat deze vereffening die vormstarre en vormbeweeglijke stoffen in hun verbinding op elkaar uitoefenen zich nu vergelijken met de wisselwerking tussen warmte en verdichting? Sommige leerlingen zullen dit willen nuanceren. Bij warmte en verdichting is immers sprake van een krachtenspel, dat uitmondt in het ontstaan van stof-eigenschappen, waarin zowel de werkzaamheid van de warmte als die van de verdichting terug te vinden zijn. Zulke eigenschappen kunnen we daarom middenkwaliteiten noemen. Bij de werking die harde en zachte stoffen tijdens het wrijven op elkaar uitoefenen is de mate van wisselwerking gering en kan de elektriciteit die daarbij ontstaat niet als middenkwaliteit worden gezien, maar als een dualiteit, die wordt gekenmerkt door een absolutere tegenstelling dan die tussen hard en zacht: het gegeven van de aantrekking tussen ongelijknamige en afstoting tussen gelijknamige polen wijst hier op. In het klassengesprek kan het vermoeden worden uitgesproken dat het ontstaan van de elektrische toestand met zijn absolute tegenstelling tot stand wordt gebracht door de confrontatie van de 'krachten' hard-zacht, die door hun aan de stof gebonden vorm wel tot een zekere vereffening, maar niet tot het ontstaan van middenkwaliteit kunnen leiden. De elektriciteit met zijn absolute karakter is te beschouwen als een verworden toestand en het ontstaan ervan kan worden opgevat als een tegenbeweging op de vereffening van de tegenstelling hard/glad-zacht/ruw die bij het wrijven optreedt.

Om het punt confrontatie te verduidelijken kan men een vergelijking inlassen. Stel twee klasgenoten die elkaar al geruime tijd kennen gaan samen op vakantie in een klein tentje. Ongetwijfeld worden zij nu voor het eerst met een aantal nog onbekende eigenschappen van de ander geconfronteerd in een situatie waar je moeilijk om deze eigenschappen heen kunt. Bijvoorbeeld springt de één 's ochtends steeds fluitend uit zijn bed, terwijl de ander veel tijd nodig heeft om wakker te worden. Tussen mensen zijn er nu twee mogelijkheden met alle tussenvormen vandien:

deze eigenschappen botsen en verharden zich, zodat de oplopende spanning zich ontlaadt in ruzie, òf je vriendschap verdiept zich omdat je merkt dat je elkaar aan kunt vullen, waarbij de wisselwerking tussen de verschillende eigenschappen aanleiding is voor het ontstaan van iets nieuws, dat de beide personen omvat en waarbij de som meer is dan de delen. De mens kent een zekere vrijheid van handelen, een vrijheidsruimte, die hij zich overigens wel moet veroveren. In de natuur is een vaste ordening werkzaam.

Ad c. Is de elektrische toestand eenmaal ontstaan, dan streeft hij er steeds naar om te vergaan. Dit kan op twee manieren plaatsvinden.

1. De elektriciteit van een positieve of negatieve pool kan zich in de ruimte versplinteren. De afstoting van gelijknamige lading tendeert al in deze richting.
2. Verder kan een vonk tussen ongelijknamige polen het veld doen verdwijnen. De aantrekking tussen de polen tendeert naar deze mogelijkheid.

Het vergaan van elektriciteit kan in verband worden gebracht met de aard van het ontstaan ervan. Dit kan aan de leerlingen duidelijk worden gemaakt door de zaken nog eens op een rijtje te zetten:

	warmte↔verdichting	*zacht-hard*	*negatief/positief*
toestand:	wordend	geworden	verworden
tegenstelling:	polair	relatief	absoluut
karakter:	samenspel	confrontatie	tegenbeweging
werkzaamheid:	wisselwerking	vereffening	vergaan
resultaat:	middenkwaliteit	dualiteit	spanning

Op een dergelijke wijze kan men voor de leerlingen zichtbaar maken dat het ontstaan van elektriciteit inhoudt dat polaire krachten van niet stof-gebonden aard, warmte en verdichting, aanleiding zijn voor het ontstaan van tegengestelde eigenschappen, die beschouwd kunnen worden als aan de stof gebonden 'krachten', terwijl deze in een proces van confrontatie en vereffening op hun beurt aanleiding zijn voor het ontstaan van een meer absolute tegenstelling, vertegenwoordigd door de elektrische polen. Deze elektrische toestand heeft blijkbaar een dusdanig eenzijdig en absoluut karakter, dat het streven te verdwijnen inherent is.

Om deze beschouwing ook vanuit een meer filosofische invalshoek te bekijken kan men de leerlingen voorhouden dat volgens de gangbare zienswijze elektriciteit niet ontstaat, maar dat elk elektrisch proces te

beschouwen is als een herverdeling van geladen deeltjes. Omdat de verschijnselen deze zienswijze niet dwingend opleggen kan een ander uitgangspunt worden gekozen, dat nauw aansluit bij de opvattingen van Aristoteles e.a. Volgens deze zienswijze is elektriciteit te beschouwen als een entiteit die zich in bepaalde omstandigheden met de ruimte en de stoffelijkheid verbindt. Elektriciteit is een fenomeen met een ruimtelijke werkzaamheid, maar heeft de stof als drager van deze werking nodig. Vanuit deze zienswijze zou het onjuist zijn te stellen dat de eigenschappen hard en zacht omgevormd worden in de elektrische polen. De situatie waarin de eigenschappen hard en zacht tot een confrontatie en gedeeltelijke vereffening komen, waarbij er door de stofgebonden aard van deze 'krachten' geen speelruimte is voor het doen ontstaan van middenkwaliteit, is aanleiding voor het in de verschijning treden van de entiteit elektriciteit. Evenzo zijn de eigenschappen hard en zacht ook niet op te vatten als metamorfosen van warmte en verdichtingswerking. De ook als entiteit op te vatten eigenschap 'hard' verbindt zich met de stof in die omstandigheden, waarin de verdichtingskrachten overheersen ten opzichte van de warmte. Wanneer de voorwaarden hiertoe zijn vervuld zal een entiteit zich noodzakelijk verbinden met de stof. Opvallend is nu dat de voorwaarden die hiertoe leiden geheel passen bij het wezen van die entiteit. De confrontatie en gedeeltelijke vereffening bijvoorbeeld van krachten die door hun stofgebonden karakter niet tot het ontstaan van middenkwaliteit aanleiding kunnen zijn, vormt het voertuig waarin de entiteit elektriciteit in de verschijning kan treden. Het wezen van de elektriciteit past bij dit voertuig, omdat het zelf een meer absolute tegenstelling vertegenwoordigt.

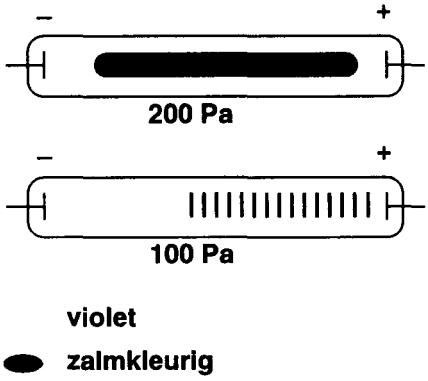
Al kan men het ontstaan van elektriciteit niet als een omvorming van de eigenschappen hard-zacht zien en deze niet als een metamorfose van warmte en verdichtingswerking, toch kan men het gehele proces als een ontwikkeling zien. In het hierop volgende klassengesprek kan dan het beeld ontstaan dat elektriciteit te beschouwen is als de laatste trede van een ontwikkelingstrap, omdat de tegengestelde krachten een in toenemende mate eenzijdig gebonden karakter krijgen. Warmte en verdichting staan in hun werkzaamheid nog boven de stof, in die zin dat zij niet aan de stof gebonden zijn. Met Rudolf Steiner kunnen wij hen krachten van de bovennatuur noemen, met dien verstande dat hij bij verdichting de kristallisatiewerking voor ogen had. De 'krachten' zacht en hard behoren tot de gewone natuur, omdat zij aan de stof gebonden zijn. De elektrische polen vertegenwoordigen een krachtensoort die een nog eenzijdiger en meer absoluut karakter heeft; Steiner rekent die tot de ondernatuur (zie deel I, paragraaf 4.9.3). In schema:

1.	*warmte en kristallisatie*	polaire krachten treden in wisselwerking	bovennatuur
2.	*zacht en hard*	aan de stof gebonden krachten in confrontatie vereffenen zich deels	natuur
3.	*negatieve en positieve elektriciteit*	absoluut tegengesteld krachten streven naar vergaan	ondernatuur

Nadat we op deze wijze zicht hebben gekregen op de oorsprong van de elektriciteit, stellen we nu de vraag of deze oorsprong, zijn afdruk vindt in de aard van de beide polen van het elektrische veld. Ook deze vraag zal aan de hand van de verschijnselen van de statische elektriciteit worden beantwoord. Vooralsnog zijn in een statisch veld geen kenmerken te vinden die verwijzen naar de oorsprong van de statische elektriciteit, te weten het vormbehoudende hard/glad bij de positieve pool resp. het vormbeweeglijke zacht/ruw bij de negatieve pool. Integendeel, de elektrische polen vertonen bij oppervlakkige beschouwing geen discriminerende kenmerken. Hooguit worden in de vonkontlading van een statisch veld de beweeglijkheid en starheid teruggevonden in de karakteristieke combinatie van grilligheid en starhoekige vorm van een vonk. De polariteit van een elektrische pool kan slechts met behulp van een andere pool worden vastgesteld: aantrekking of afstoting zijn dan bepalend voor de gezochte identiteit. Anders wordt het wanneer we het vergaan van een statisch veld beschouwen in samenhang met de vorm van de elektroden. De rhumkorff-inductor biedt daartoe een mogelijkheid. Deze kan van een platte en een puntige elektrode worden voorzien. Het statische veld dat wordt aangebracht kan worden omgepoold. Laten we de leerlingen uitspreken hoe de verschillen die aan positieve en negatieve kant optreden geduid kunnen worden, dan wijzen zij er op dat de positieve pool blijkbaar een 'voorkeur' heeft voor de puntige of anders voor de rand van een platte elektrode, terwijl de negatieve pool overeenkomstig een 'voorkeur' heeft voor het platte vlak, of anders voor het meest vlakachtige aan de puntige elektrode, de zijkant.

Zoals eerder gesteld ligt het in het wezen van het elektrische veld besloten om te vergaan. We leggen aan de klas de vraag voor wanneer dit het beste kan geschieden. Blijkbaar als de drager van de positieve pool een ruimtelijk verdichte en van de negatieve pool een in de ruimte uitgebreide vorm heeft. Hier vinden we een kenmerk van de oorsprong van het elektrische veld terug. Want hoewel het ontstaan van het elektri-

sche veld altijd het ontstaan van beide polen gezamenlijk inhoudt, vormen de harde stoffen, dat wil zeggen stoffen die in sterkere mate de verdichtingswerking vertegenwoordigen, het voertuig waarin de positieve pool van het veld in verschijning kan treden. Op dezelfde wijze vormen zachte stoffen, die met hun grotere beweeglijkheid en mindere verdichting meer de warmtewerking vertegenwoordigen, het voertuig voor de negatieve pool.



De gasontladingsbuizen van William Crookes (1832-1919) kunnen het inzicht in de aard van de polen van het elektrische veld nog verdiepen. Laat men de vonk-ontlading van een hoogspanningsveld in een gas onder afnemende druk plaatsvinden, dan treden de verschijnselen die met ontlading samengaan aan positieve en negatieve zijde onderscheiden op. Mooi is dit te zien in een set buizen met afnemende druk. Bij een druk van 200 Pa ziet men een violet licht rond de negatieve pool. Naast dit licht is een donkere plek. Daarnaast vindt men naar de positieve pool toe een zalmkleurig licht. In de volgende buis heerst een druk van 100 Pa. Het violette licht aan de negatieve pool bestrijkt een groter gebied en is egaal van vorm. De donkere plek is verschoven ten opzichte van de vorige buis. Het zalmkleurige licht bij de positieve pool is meer samengetrokken en heeft een gelaagde ringenstructuur gekregen. Vragen we aan de leerlingen wat er is gebeurd tussen deze en de vorige buis, dan zullen zij dit als volgt benoemen: het violette licht aan de negatieve pool heeft zich egaal uitgebreid, het zalmkleurige licht bij de positieve pool heeft zich verdicht tot een gelaagde structuur. Dus een dubbele verdichting heeft in het licht aan de positieve pool plaatsgevonden: het licht heeft zich als geheel, maar ook nog tot lagen verdicht. Opnieuw zullen de leerlingen de kenmerken verdichting en uitbreiding herkennen van respectievelijk de positieve en negatieve pool van het elektrische veld. Alleen betreft het hier een overtreffende trap van beide kenmerken: het is gestructureerde verdichting

aan de positieve en egale uitbreiding aan de negatieve pool. De indruk kan ontstaan dat deze bij de polen van het veld behorende eigenschappen zich aan een vonk in een gas onder lage druk beter kenbaar kunnen maken en daarom meer specifiek in verschijning kunnen treden.

Bij een druk van circa 3 Pa zijn de lichtverschijnselen aan de polen van een gasontladingsbuis geheel gescheiden. Op een enkel kenmerkend verschil kan in dit verband nog worden gewezen. De kathodestraling, afkomstig van de negatieve pool, is al met een zwakke magneet af te buigen, anodestraling afkomstig van de positieve pool is pas af te buigen met een zéér krachtig elektromagnetisch veld. Daarbij is de mate van afbuiging bij straling van de negatieve pool onafhankelijke van het gas in de buis, terwijl bij de positieve pool de mate van afbuiging wel afhankelijk is van dit gas. Deze is namelijk omgekeerd evenredig met het massagetal of de standvastigheid van dit gas. Een laatste kenmerkend verschil tussen het licht bij de beide polen is dat kathodestraling voor elk gas dezelfde violette kleur heeft, terwijl het licht bij de anode per gas van kleur verschilt. Het verschil in afbuiging door een magneetveld zullen de leerlingen weer op één lijn kunnen brengen met de tegenstelling vormbeweeglijkheid en -starheid van de stoffen die bij confrontatie aanleiding zijn voor het ontstaan van een elektrisch veld.

Nog een samenhang wordt zichtbaar, als we de klas de gang laten beschrijven van warmtewerking/gas via zachte stof naar negatieve elektriciteit. De eenheid van de gaswereld (stof volledig gemengd, alle gassen dezelfde uitzettingscoëfficiënt), het feit dat het oppervlak van zachte stoffen bij wrijven dichtgesmeerd raakt, dat zij zich meer voegen waardoor zij in zeker opzicht meer een geheel blijven dan harde stoffen, de egale uitbreiding van het licht aan de negatieve pool in de buis met 100 Pa en de bij alle gassen gelijke afbuiging van hetzelfde licht bij een druk van 3 Pa, al deze fenomenen hebben dezelfde signatuur die kan worden aangeduid met het begrip *uniformiteit*. Zo hebben anderzijds de veelheid van aparte voorwerpen bij de vaste stof (verdichtingswerking), de harde stof die bij wrijven versplintert, het licht aan de positieve pool in een buis van 100 Pa dat uiteenvalt in lagen en hetzelfde licht in een buis van 3 Pa dat een mate van afbuiging door een magneetveld vertoont dat per gas verschilt, eveneens dezelfde signatuur, namelijk een van *diversiteit*. Het feit dat anodestraling per gas van kleur verschilt, terwijl kathodestraling altijd dezelfde kleur heeft past ook in deze samenhang. Samenvattend komen we tot het volgende overzicht:

	positief	*negatief*
oorsprong:	hard, glad, edel (vormbehoudend)	zacht, ruw, onedel (vormbeweeglijk)
kenmerken bij rhumkorff:	puntige drager verdichte vorm	vlakte drager uitbreidende vorm
drukbuizen:	verdichting tot structuur, afbuiging bij krachtig magneetveld verschilt per gas, kleur anodestraling verschilt per gas	egale uitbreiding, afbuiging bij zwak magneetveld gelijk voor alle gassen, kleur kathodestraling voor alle gassen gelijk
verwantschap:	verdichting en diversiteit	uitbreiding en uniformiteit

Op deze wijze wordt voor de leerlingen concreet beleefbaar dat de elektrische polen als in eenzijdigheid gebonden werkingen te beschouwen zijn. Hoewel de stof drager of aanhechtingspunt is van deze werkingen, is de ruimte rond deze drager zelf veranderd en heeft de kwaliteit 'elektrisch' gekregen. Dit wordt aangeduid met het begrip elektrisch veld. De ruimte rond een positieve pool heeft een naar verdichting tenderende structuur, die rond de negatieve pool een naar egale uitbreiding strevende kwaliteit. Het elektrische veld oefent zijn werkzaamheid alleen uit op soortgelijke, te weten andere elektrische of magnetische velden.

In het voorgaande is gepoogd een voor 11e klassers toegankelijke weg te beschrijven, die hen nader kan brengen tot een wezenlijk begrip van elektriciteit. Tevens is geprobeerd deze weg zó te beschrijven dat leerlingen zo actief mogelijk in het kennisproces betrokken kunnen worden. Op meerdere plaatsen kan de behandelde stof aanleiding geven tot een klassengesprek. Als men bijvoorbeeld de aan de stof gebonden krachten hard-zacht vergelijkt met de in eenzijdigheid gebonden ruimtelijke elektrische werkingen positief-negatief, dan kan bij de klas een parallel opkomen met verschillende soorten eenzijdigheden in het menselijk bestaan. Je kunt bijvoorbeeld een lichamelijke handicap hebben of je kunt eenzijdig denken. Beide hebben hun invloed, maar werken heel anders uit. Dergelijke klassengesprekken verlevendigen niet alleen het begrip van de behandelde stof, maar belichten ook de menselijke ervaring van alle dag en dragen bij tot de morele ontwikkeling van de leerlingen.

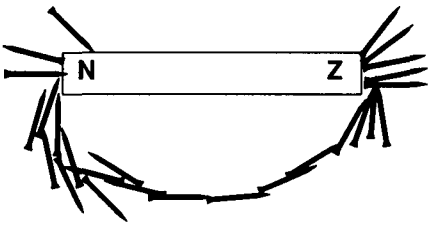
3. BEGRIPS- EN IDEEËNVORMING ROND DE LESSTOF

3.1 Oerfenomenen van het statische elektrische en statische magnetische veld

Het oerfenomeen van een gebied van verschijnselen is het elementaire fenomeen dat het hele gebied van deze verschijnselen in zijn essentie weergeeft. Men onderzoekt dit oerfenomeen op ontstaansvoorwaarden en de tendensen die zich erin uitspreken. Aan de leerlingen worden de oerfenomenen van het elektrische en magnetische veld zo efficiënt mogelijk gepresenteerd. Methodisch wordt hierbij de synthetische weg bewandeld, de fenomenen worden zo elementair mogelijk getoond en het meest wezenlijke ervan wordt getypeerd. Meestal heeft de onderzoeker c.q. docent er langdurig en analytisch aan gewerkt voordat hij tot zo'n pakkende presentatie kon overgaan.

Het statische magnetische veld:

- Neem een vijftal magneten en breng ze naar elkaar toe. Ze zullen draaien en aan elkaar klitten, waarna het moeite kost om ze van elkaar te halen. Zelfs wanneer ze elkaar niet meer aanraken zijn ze krachtig op elkaar georiënteerd. De magneten kan men gewoon in de hand houden. Men voelt niets en het magnetisch effect verandert er niet door.
- Neem twee magneten en een doosje met kleine spijkertjes. Aan één magneet kunnen veel spijkertjes in een boog vastklitten.
  Neemt men nu twee magneten met noord- en zuidpolen naar elkaar toegewend, dan is het aantal spijkertjes dat vastgehouden kan worden aanmerkelijk minder. Trekt men de magneten uit elkaar dan kunnen er weer veel spijkertjes worden vastgehouden.
- Proeven met ijzervijlsel kunnen toegevoegd worden.



Uit deze proeven blijken de volgende tendensen:

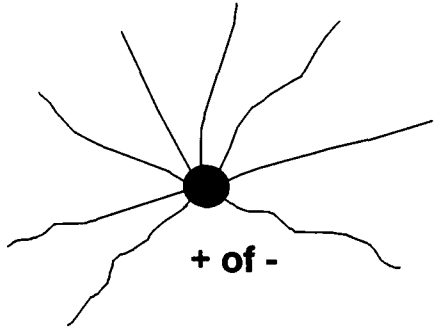
- Magneten zijn van speciale stoffen gemaakt, meestal van ijzer- of nikkellegeringen.
- Om de magneet als ruimtelijk afgebakend voorwerp is een werkingsruimte.

- Deze ruimte heeft een cirkelachtige gesloten structuur.
- Deze werkingsruimte tendeert ernaar om te verdwijnen in gesloten ijzer- of nikkelketens.

Meestal is het nodig er nog wat omheen te vertellen en op vragen naar variaties van proeven in te gaan.

Het statische elektrische veld

- Neem twee kunststof platen (bijvoorbeeld een pvc- en een plexiglasplaat van ongeveer 30×12×0,4 cm, hiervan is de tegenstelling zacht-hard vrij groot) en wat papiersnippers (confetti bijvoorbeeld, dat is glad en strak afgesneden) of kurkvijlsel. Maak de platen goed schoon en droog (verwarm ze even van tevoren op een c.v.radiator) en zorg dat het papier glad en droog is. Wrijf de platen met elkaar, trek ze van elkaar af en houd ze na elkaar boven de op tafel liggende snippers. De snippers zullen tussen de platen en de tafel heen en weer springen. Meestal blijft er wat aan hangen. Houd dan de plaat verticaal en tik ertegen, de snippers springen er dan af.
- Neem een elektriseermachine en maak een bundel papierslierten elektrisch. De slierten stralen radiaal uit en wanneer je met je vinger naar een sliert toe gaat komt die je tegemoet en tikt je even aan, alvorens weer weg te gaan. Dit herhaalt zich tot alle slierten weer naast elkaar naar beneden hangen:
- Proeven met twee bundels slierten naast elkaar, beide +, beide — of de een + de ander —.
- Een sliert papier tussen de polen van een elektriseermachine zal met grote snelheid tussen de polen heen en weer bewegen, waarbij de sliert de polen om en om even aantikt.



Uit deze proeven blijken de volgende typeringen:

- Men kan twee willekeurige materialen voor de platen kiezen, maar belangrijk is de tegenstelling hard-zacht.
- Om de gewreven platen is een werkingsruimte.
- Deze ruimte heeft een radiale structuur.
- Deze werkingsruimte tendeert ernaar te verdwijnen aan dingen in de omgeving.

Ook hier kunnen nog tal van proefjes bij aangesloten worden om het oerfenomeen te karakteriseren.

De tegenstelling van het elektrische en het magnetische veld

Uit de beschreven karakteristieken blijkt de tegengestelde natuur van het elektrische en magnetische veld:

elektrische veld	*magnetisch veld*
- Alles wordt door wrijven elektrisch, zelfs twee dezelfde materialen, vloeistoffen of luchtlagen.	- Alleen ijzer-, nikkel-, of kobaltlegeringen kunnen ferromagnetisch worden.
- De twee voorwerpen vertegenwoordigen ieder een pool.	- Een magneet vertegenwoordigt beide polen.
- Alle stoffen worden aangetrokken in de werkingsruimte. Iedere plaat heeft zijn eigen werkingsruimte; die van de harde plaat wordt plus genoemd en die van de zachte min.	- Alleen ijzer, nikkel of kobalt kan worden aangetrokken in de werkingsruimte van de magneet. De noord- en zuidpool kunnen niet ruimtelijk gescheiden worden.
- De structuur van het veld is radiaal en open.	- De structuur van het veld is cirkelvormig en gesloten.
- Het elektrische effect wil verdwijnen of oplossen in de omgeving.	- Het magnetische effect wil verdwijnen of zich verdichten in de stof.

Hebben de leerlingen deze fenomenen eenmaal helder voor zich, dan is het goede moment gekomen voor de introductie van het begrip "veld". Wanneer men over veld spreekt, dan is dat niet een verzameling van relaties, maar het is een begripsmatige beschrijving van de waargenomen fenomenen. Een veld is een ruimte waarin bepaalde werkingen plaatsvinden. Deze ruimte zelf heeft in verband met deze werkingen een andere kwaliteit gekregen. Als zodanig is het veld, als ruimte met kwaliteit, zèlf een fenomeen. Wanneer Faraday over "krachtlijnen" sprak, dan keek hij als het ware verinnerlijkt naar de fenomenen. Opnieuw zien we hier dat de elektriciteit en het magnetisme ons nopen meer innerlijk naar de natuur te kijken. Dat Faraday's veldbegrip later door Maxwell in een wiskundige beschrijving is gevat, laat zien dat het ook een kwantificeerbaar aspect heeft, maar doet aan het kwaliteitsaspect niets af.

Wanneer twee platen gewreven en vervolgens van elkaar getrokken worden, dan moet onze blik niet zozeer op de platen, die zoals gezegd elkaar aantrekken, maar op het veld gericht worden. Het veld tendeert ergens toe, het trekt de plaat mee. Ook vervormt het zich wanneer er een voorwerp in de buurt is. Het elektrische veld zit vast aan de plaat gezogen, maar wil hier van loskomen, omdat het er naar tendeert in de ruimte te verdwijnen. Wanneer papierslierten zich radiaal in een elektrisch veld richten, dan drukt dit hetzelfde uit. Het veld is gericht op het oneindige, daarmee uitdrukking gevend aan de tendens die er in besloten ligt om te verdwijnen. Daarbij verdeelt het veld zich zo over de geleider dat aan randen en punten de veldverdichting het grootste is. Op die plaatsen is de drang om los te komen van de zuigende drager geïntensiveerd. Het voorwerp, onafhankelijk van welk materiaal het is, zuigt het veld des te sterker aan zich vast op die plaatsen waar:

1. de bolling van het oppervlak geringer,
2. het oppervlak gladder,
3. de temperatuur lager,
4. en het voorwerp beter geïsoleerd en minder vochtig is.

Een puntig, ruw, klein of warm voorwerp kan een elektrisch veld niet vasthouden. Hier kan het veld dus makkelijker de tendens volgen om te verdwijnen in de ruimte. Typerend voor het elektrische veld is dat het altijd aan de buitenkant, aan de bolle kant van geleiders zit. Daarin manifesteert zich weer het gericht-zijn op de omgeving. Een elektrisch veld is nooit op een centrum gericht, maar het zoekt aan de drager de meest scherpe en uitstekende delen op, omdat daar het houvast het kleinste is en het zich dus het gemakkelijkste van de stof kan losmaken.

Bij het wrijven ontstaat elektriciteit aan vlakken die goed met elkaar in contact komen. De vlakken moeten niet zozeer van verschillend materiaal zijn als wel tegengestelde eigenschappen hebben, waarbij de tegenstelling hard-zacht de belangrijkste is en die van glad-ruw op de tweede plaats komt. Wrijven met kattenvellen, zijden doeken e.d. is niet wezenlijk voor het fenomeen van statische elektriciteit. Vervolgens moeten de in elkaar gewreven platen uit elkaar getrokken worden en dan komt het veld tevoorschijn. Het is weer kenmerkend voor de statische elektriciteit dat alleen de oppervlaktegesteldheid - dus één heel bepaalde eigenschap - een overheersende rol speelt.

Samenvattend: statische elektriciteit ontstaat op de oppervlakten van stoffen, handhaaft zich hier vervolgens ook en verzamelt zich daarbij op de punten en de randen, waar het veld het gemakkelijkste los kan komen van deze oppervlakken.

Meerdere fenomenen kunnen de beschreven tendens bevestigen:

- Proeven met statische elektriciteit zijn altijd relatief snel voorbij, er moet steeds opnieuw gewreven worden.
- Aan een veldverdunning (oplossen van het veld) gaat altijd een veldvervorming en verdichting vooraf. We zagen dit al bij het veld rond de randen en punten van een elektrisch voorwerp, waar veldverdichting optreedt, waarna het veld makkelijk los kan komen van de stof en de tendens tot oplossen in de ruimte kan volgen. De vonk is een ander voorbeeld van dit fenomeen. De vonk laat prachtig de polariteit punt-oneindigheid zien. Het veld verdwijnt niet in de vonk, maar de vonk is een uitdrukking van het loskomen van het veld van de drager. Het punt waar de vonk ontstaat is daarbij de sublieme mogelijkheid voor het veld om los te komen. Het geeft een krachtige veldverdichting, waarna het veld vervolgens vervliegt in de ruimte. Later zal de vonkenzender worden besproken, waarvan de werking op dit fenomeen gebaseerd is.
- Twee gewreven platen (hard geeft positieve, zacht negatieve elektriciteit) zuigen elkaar aan. Het veld heeft een zuigende werking. Tijdens het ontstaansproces is het verzet tegen het in de ruimte getrokken worden nog te groot. Het veld wil als het ware niet tevoorschijn komen. Het moet de ruimte in getrokken worden vanuit een vlak. Het eindige vlak toont zich hierbij verwant aan het oneindig verre vlak, waar het verdwijnende veld naar toe streeft.
- Plaatst men een kunststof bakje met confetti op een draaiende Van de Graaf generator, dan worden de papiersnippertjes uitgestrooid in de ruimte. De veldversplintering die hierbij optreedt is ook een uitdrukking van de tendens tot verdwijnen en oplossen, maar nu in een veelheid van elkaar uitsluitende veldjes.
- Een voorwerp dat een elektrisch zuigveld om zich heen heeft kan men aarden, waardoor het veld verdwijnt. Een tussenstap is dat men het oppervlak van het voorwerp vergroot, waardoor de zuigkracht of veldsterkte kleiner wordt. De aarde is een gigantisch oppervlak, waar de veldverijling in extreme mate kan plaatsvinden.
- Bij de gesloten kring, die later nog uitgebreider besproken zal worden, werken de positieve en negatieve pool zo op elkaar in dat er een verdwijnproces kan plaatsvinden, echter niet in de ruimte. Samen vertegenwoordigen de polen als het ware de punt en oneindigheids-extremen. Dit aspect komt later nog uitgebreider aan bod.
- (Hoogfrequente) hoogspanning moet altijd goed geïsoleerd worden, omdat anders de elektriciteit zelfs uit de gesloten kring verdwijnt.
- Plaatst men een elektroscoop onder een elektrische condensatorplaat, dan slaat hij uit. Schuift men de elektroscoop weg, dan verdwijnt de

uitslag. Dit verschijnsel wordt elektrische influentie genoemd. Het is reeds door Faraday beschreven dat alle voorwerpen in een elektrisch veld polariseren. Houdt men nu bij de condensatorplaat en de elektroscoop een vlakke kunststof of metalen plaat, dan wordt de uitslag nog versterkt. Houdt men echter een holle metalen plaat met de holle kant naar de elektroscoop, dan neemt de uitslag af (kooi van Faraday). Afscherming van het veld kan alleen binnen een bol metalen voorwerp geschieden. De holle kant is dan niet gericht op het oneindige en het veld zal dus bij de holle kant vandaan gaan.

Samenvattend: een elektrisch veld zit vastgezogen aan een voorwerp. Het veld streeft via veldverdichting naar veldverijling.

Beschouwen we vervolgens het magnetische veld. Nadat een magneet eenmaal is ontstaan, blijft hij lange tijd zijn magnetische activiteit behouden. Door één magneet lange tijd in de vrije ruimte te plaatsen, door een magneet te verwarmen of er tegen te stoten verdwijnt de magnetische activiteit het snelst. Door meerdere magneten aan elkaar te laten klitten of door een magneet in een gesloten ijzeren omhulling te bewaren blijft de magnetische activiteit het beste behouden. Een magneet hoeft dus niet geïsoleerd te worden om de kracht ervan te behouden, integendeel, isolatie leidt tot verzwakking.

Ook bij de magneet kijken we naar de verhouding van veld tot drager. Hier valt meteen op dat het materiaal van doorslaggevende betekenis is, terwijl in tegenstelling tot het elektrische veld de oppervlaktegesteldheid van de drager niet van belang is. Het veld heeft twee polen, de noord- en de zuidkant, waar het veld het sterkste is en die ook altijd op hun plaats blijven. Wanneer men een magneet in twee stukken breekt, dan heeft men twee magneten met ieder een noord- en zuidpool. Dit is bij het elektrische veld anders. Breekt men een positief geladen staaf in tweeën, dan blijven de delen positief en sluiten elkaar vervolgens uit: ze stoten elkaar af. Wanneer een staaf door influentie in een veld aan de ene kant positief en aan de andere kant negatief wordt en vervolgens wordt gebroken, dan zal, ook buiten het veld, het ene deel positief en het andere negatief zijn.

Een magnetisch veld is steeds gesloten. Wanneer men een staaf magnetisch maakt, dan lopen de veldlijnen zowel in als buiten de staaf tussen de noord- en zuidpool. Brengt men een stuk ijzer, nikkel of kobalt in een magnetisch veld, dan treedt er veldverdichting op.

Het magnetische veld toont zijn karakter op de volgende wijze. Alleen heel specifieke materialen brengen dit sterke veld in verschijning. Het veld streeft altijd naar verdichting en intensiteitsvermindering. Hoe meer het veld zich verdicht, hoe minder het veld op de omgeving werkt,

omdat het zich in de concentratie van het veld afsluit van de omgeving. Rond twee magneten, die met noord- en zuidpolen aan elkaar geklit zijn, is bijna geen veld te constateren. Verder is het magnetisch veld relatief blijvend en streeft het naar een relatief vaste structuur.

Enkele proeven kunnen dit beeld nog aanvullen:

- Het magnetisch veld van een spoel wordt gericht en geconcentreerd door een ijzeren kern.
- Een ijzeren kern wordt krachtig in het centrum van een spoel getrokken, wanneer de spoel plotseling magnetisch wordt. Meestal schiet de kern een aantal keren heftig heen en weer.
- Het magnetisch veld van een spoel komt langzaam op volle sterkte. Hieruit blijkt het behoudende van het veld.
- Wordt een spijker gemagnetiseerd, dan gaat dit met horten en stoten en vraagt dit enige tijd. Het veld verdicht zich stapsgewijze in de spijker, moet zich als het ware settelen. Dit wordt het Barkhausen-effect genoemd.
- Een magneet van een luidspreker met ijzeren omhulsel verliest 10 à 20% van zijn kracht als hij uit dit omhulsel wordt gehaald.
- Een transformator werkt des te beter naarmate de kern een gesloten geheel vormt (U-kern met juk).

Een magneet is op zijn best wanneer de configuratie van magneet en omliggend ijzer niet verandert. Het veld tendeert naar vaste, blijvende structuren. Veranderingen vragen tijd, maar altijd zal zich de maximaal haalbare veldverdichting instellen. Het veld drukt een tegenstelling uit tussen structuur en verdichting. Structuur biedt normaal gesproken ruimte voor iets anders, bijvoorbeeld bewegingsruimte. Een goede organisatiestructuur biedt bijvoorbeeld de ruimte tot handelen aan de participanten. Gaat structuur echter gepaard met verdichting, zoals bij het magnetische veld, dan leidt dit tot starheid en afgeslotenheid.

Plaatst men nu nogmaals het elektrische en magnetische veld naast elkaar, dan kan de eerder beschreven dualiteit nog verder gepreciseerd worden:

elektrisch veld

- Het elektrisch veld drukt zich uit in verandering, snelheid, beweeglijkheid en proces.
- Het veld wil zich losmaken van de stoffelijke drager en opgaan in de wereldruimte.

magnetisch veld

- Het magnetisch veld tendeert naar onveranderlijkheid, starheid, traagheid en gestructureerde vorm.
- Het veld wil zich vastzetten in een stoffelijke (ijzeren) omgeving.

- Het veld streeft via veldverdichting naar verijling. Hieruit spreekt de tegenstelling punt-oneindigheid.

- Het veld streeft naar een structuur en naar verdichting.

Tegenover elkaar staan dus:

proces	*vorm*
opgaan in de wereldruimte	*gebonden aan de stof*
punt-oneindigheid	*structuur, verdichting*

We richten nu onze aandacht op de dragers van deze twee karakteristiek tegengestelde velden.

Het ijzer als representant van de drie opeenvolgende stoffen nikkel, ijzer en kobalt in het periodiek systeem van elementen heeft de bijzondere eigenschap dat het magnetische veld zich aan deze stof kan openbaren, zoals dat ook mogelijk is aan de aarde, enkele andere planeten en de zon. We laten hierbij het para- en diamagnetisme, alsmede de samarium-magneten die van legeringen van elementen uit de groep van de zeldzame aarden worden gemaakt, nog even terzijde. (Zie hiervoor paragraaf 3.2). De oorsprong van het magnetisch veld is, als we afzien van de gangbare modelbeschrijving, in raadselen gehuld. We willen hier het uitgangspunt openlaten dat het magnetische veld als een primaire, zelfstandige identiteit kan worden gezien. We zullen daarom het feit dat het magnetische veld zich aan ijzer kan manifesteren als een bijzondere eigenschap van ijzer beschouwen.

IJzer heeft de grootste soortelijke warmte per volume-eenheid van alle elementen (zie deel I, hoofdstuk 4). Dat wil zeggen dat ijzer heel ver geëmancipeerd is van de warmtesfeer, die alles tot een stoffelijke eenheid wil omvormen. IJzer heeft zich dus in hoge mate verzelfstandigd. Ditzelfde beeld ontstaat wanneer ijzer wordt bekeken in het kader van het verschijnsel radioactiviteit. IJzer houdt het midden tussen fusie en splijting, kan aan beide soorten processen niet deelnemen. Het stelt zich dus ook in dit opzicht autonoom op. Een derde karakteristiek is de bepalende factor die het vormt in het bloed. Bij bloedarmoede, als het bloed te weinig ijzer bevat, kan de mens zich niet zelfstandig en krachtig genoeg manifesteren. Het ijzer staat voor autonomie en het magneetveld, dat zich aan het ijzer kan manifesteren, laat een bepaalde kant van dit streven naar autonomie zien, namelijk de tendens tot verstarring, verdichting en zich afsluiten. In zoverre is het magnetisme een beeld voor het eenzijdig streven van een mens, die zich star opstelt en zich afsluit voor de mening en de invloed van anderen.

Voor het elektrische veld is de vlakke of bolle buitenkant van een stof bepalend. Het gaat hierbij niet om specifieke stof-eigenschappen, maar om het grensvlak dat de stof van de omgeving scheidt. Het binnen/buiten-aspect is wezenlijk. Dit is overigens een algemeen principe, dat voor alle natuurrijken en ook voor de vier elementen betekenis heeft. Bij de elementen treedt het binnen/buiten-principe echter pas bij het water- en aarde-element in verschijning. Het vuur- en lucht-element hebben de eenheid, het streven naar eenwording en elkaar doordringen, heel sterk in zich, terwijl voor het water- en aarde-element de scheiding, het naast elkaar staan, karakteristiek is. Alleen deze laatste twee vormen blijvende oppervlakken. Gladde, bolle, spiegelende oppervlakken zoals spiegels en wateroppervlakken laten juist niets van de binnenkant zien, ze geven daarentegen de omgeving als beeld weer. Ook wanneer een mens dingen "spiegelt" toont hij daarbij niet zijn eigen binnenkant, zijn eigen gedachten en gevoelens, maar alleen die van zijn omgeving. Juist aan deze gladde buitenkant van de stof kan het elektrische veld zich manifesteren. Het veld zuigt aan dit oppervlak en wil het meenemen de ruimte in, zoals bijvoorbeeld de confettiproef laat zien. Het wil eigenlijk de scheiding tussen binnen en buiten die het vlak betekent opheffen. Het elektrische veld streeft naar een lucht-, vuur- of lichtachtige toestand.

Het vlak vormt de scheiding tussen binnen en buiten en het elektrische veld dat aan dit vlak wordt vastgehouden heeft de tendens dit grensvlak op te heffen. Meestal echter vervluchtigt het veld zelf in de ruimte.

Als laatste stap op de methodische weg zal de gevonden gestiek van beide velden verder worden verdiept door deze innerlijk na te voelen. Men overdenkt het elektrische en magnetische gebaar en probeert vervolgens verwante belevingen te vinden die zich in onze ziel afspelen.

Het aan het magnetisme verwante streven naar autonomie in het persoonlijke leven of in de staatspolitiek slibt soms dicht door verstarring en dogmatiek. De angst om de greep op jezelf of de omgeving te verliezen leidt dan tot krampachtig vasthouden aan regelgeving, waardoor autonomie verwordt tot dictatuur van de enkeling over de ander of, om een ander voorbeeld te noemen, van de economie over de cultuur.

Voor het elektrische veld is het vlak als scheiding tussen binnen en buiten typerend, evenals de veldverdichting ten behoeve van de veldverijling in de ruimte. Na een intensief inlevingsproces kan men dan tot de volgende vergelijking komen. Het streven naar de bevrediging van begeertes kent ook de fase van het bemachtigen van de situatie ten behoeve van de bevrediging, vergelijkbaar met de verdichting van het elektrische veld, waarna de fase van het genot volgt, hetgeen vergelijkbaar is met de vervluchtiging. In onze cultuur zijn er voorbeelden genoeg

te vinden. De seksindustrie speelt bijvoorbeeld in op de wil tot bemachtiging, door allerlei mogelijkheden op voor de consument beheersbare wijze binnen handbereik te brengen. Ook het nationalisme dat zich overal ter wereld doet gelden streeft via grote en onsympathieke inspanning (verdichting) naar het veilig stellen van de eigen situatie (verdunning). Om een ideologie te verwezenlijken (verdunning) getroost men zich met ontoelaatbare middelen tal van inspanningen (verdichting).

Meestal werken de "elektrische" en "magnetische" tendensen samen. Een ideologie brengt bijvoorbeeld verstarde, behoudende systemen met zich mee. De hier genoemde vergelijkingen zijn in krasse bewoordingen weergegeven. Hiermee is echter niet bedoeld dat idealen, genot en een gestructureerde samenleving verachtenswaardig zijn, integendeel, het gaat juist om de integratie van al deze zaken, in plaats van de polarisatie.

Wel is het opvallend dat gevoelens als vreugde, verdriet, vriendschap en medeleven niet aansluiten bij de elektrische en magnetische fenomenen. De zieletoestanden die meer met verinnerlijking en relaties te maken hebben laten zich met behulp van deze natuurbeelden niet goed beschrijven. Wellicht is het ook zo dat de huidige elektrocultuur terugwerkt op de mens, dat de polariserende en dualiserende effecten de mens sterker beïnvloeden dan hij zelf zou willen. Maar dit doet tevens een dringend appèl op de innerlijk morele mens, die zijn weg zoekt tussen de grootste tegenstellingen.

3.2 Magnetisme

De magneetsteen -het magnetiet- was al in de griekse tijd bekend. Thales van Milete (circa 500 v.C.) sprak over de bezielde steen omdat er de begeerte van uitging om ijzer aan te trekken. In de late middeleeuwen schreef Gilbert Petrus Peregrinus een veel herschreven werk over magneten. Hij dacht dat het magnetisme ontstond door een kosmische inwerking.

Heel lang is het magnetisme een raadsel gebleven, waardoor er weinig ontwikkeling, ook in technische zin, plaatsvond. Tot 1930 werden er naast elektromagneten alleen permanente magneten van ijzerlegeringen gemaakt. In de dertiger jaren is de alnico-magneet ontwikkeld, die een grotere magnetische kracht had en deze ook langer behield. In 1952 werd een heel nieuw soort magneten, de keramische ferriet-magneten, ontwikkeld, waarvan het marktaandeel sindsdien tot 70% is opgelopen. In de zeventiger jaren zijn magneten gemaakt met elementen uit de groep van de zeldzame aarden. Deze hebben zelfs bij kleine afmetingen een grote magnetische kracht. Gezien de hoge materiaalkosten worden ze nog niet

veel toegepast. De laatste tien jaar zijn er verscheidene legeringen of materialen samengesteld die magnetisch zijn te maken, waaronder zelfs metaalvrije kunststoffen. Per jaar wordt er circa 200 miljoen kg aan magneten vervaardigd, die met behulp van elektromagnetisme permanent magnetisch worden gemaakt. Het grootste deel wordt toegepast in motoren en luidsprekers en in de telecommunicatie.

De magnetische eigenschappen van stoffen kunnen als volgt onderscheiden worden:

1. *Diamagnetische stoffen*
   Deze worden in heel sterke magnetische velden uit het veld geduwd, zij ontwijken de magnetische veldverdichting. In het periodiek systeem van elementen zijn de stoffen van de eerste drie periodes voornamelijk diamagnetisch. Vanaf de vierde periode zijn de stoffen rechts in het periodiek systeem diamagnetisch, namelijk van stofnummer 29 koper t/m 36 krypton, van 47 zilver t/m 54 xenon (op 50 tin na) en van 79 goud t/m 86 radon. De sterkte van het diamagnetisme neemt op onregelmatige wijze door het periodiek systeem heen toe. Antimoon (51) en bismut (83) hebben de grootste waarden. Water is ook diamagnetisch, evenals glas. Het diamagnetisch is vrijwel onafhankelijk van de temperatuur.

2. *Paramagnetische stoffen*
   Deze stoffen worden in heel sterke magnetische velden in het veld getrokken. Alle stoffen links in het periodiek systeem zijn, op die van de eerste drie periodes na, paramagnetisch. Ook zuurstof is, als uitzondering op de regelmaat, vrij sterk paramagnetisch. Het paramagnetisme is afhankelijk van de veldsterkte en in tegenstelling tot het diamagnetisme ook van de temperatuur: bij toenemende temperatuur neemt het paramagnetisme af.

3. *Ferromagnetisch elementen*
   Ferromagnetische stoffen zijn gemakkelijk te magnetiseren, worden in het veld gezogen en brengen een grotere veldverdichting tot stand. De harde ferromagnetische stoffen zijn na het magnetiseren permanent magnetisch. Dit zijn ijzer, nikkel, kobalt en bij zeer lage temperatuur de zeldzame aarde elementen samarium, gadolinium, terbium en cerium. De zachte ferromagnetische stoffen verliezen na het magnetiseren hun magnetische karakter. Er zijn echter veel legeringen en verbindingen bekend die de bovenstaande elementen niet bevatten en toch ferromagnetisch zijn. Het ferromagnetisme is sterk afhankelijk van de temperatuur en van de stofstructuur. Boven de zogenaamde curietem-

peratuur zijn ferromagnetische stoffen paramagnetisch. Voor ijzer, nikkel en kobalt ligt deze curietemperatuur vrij hoog: respectievelijk 774°C, 372°C en 1131°C. De allersterkste neodynium-ijzer-boron magneten zijn sterk afhankelijk van de temperatuur: boven 80°C daalt de magnetische veldsterkte drastisch. Verder zijn deze magneten erg gevoelig voor aantasting en oxidatie.

4. *Ferromagnetische oxiden*
Deze magneten zijn vervaardigd uit ijzeroxide en bijvoorbeeld bariumoxide voor zachte magneten (met een laag remanent magnetisme) en barium voor harde magneten (met een hoog remanent magnetisme). De magneten worden gemaakt door de oxiden fijn te malen en te sinteren (persen en bakken) bij een temperatuur van 1300°C. Keramische magneten zijn zeer geschikt voor hoog frequente transformatoren. De harde magneten hebben een zeer groot tegenveld nodig om te demagnetiseren. Mede daarom verouderen ze haast niet en zijn ze vrijwel ongevoelig voor stoten. Het remanente magnetisme is echter kleiner dan dat van koolstof-staal- of alnicomagneten. Vanwege de geringe kostprijs worden deze magneten het meeste toegepast. Het bijzondere van de kristalstructuur van keramisch materiaal is dat het niet kubisch is, zoals bij andere magneten, maar hexagonaal. Hexagonale kristallen hebben, in tegenstelling tot kubische kristallen, vaak een éénassige voorkeursrichting waarin ze gemagnetiseerd kunnen worden, namelijk langs de ribbe.

Enkele karakteristieke verschillen in eigenschappen tussen harde en zachte magnetische materialen zijn:

hard magnetisch	*zacht magnetisch*
regelmatig kristalrooster;	heel zuivere elementen of legeringen/verbindingen;
rustige, fijnkorrelige kristalstructuur;	liefst over één as te magnetiseren.
liefst over meerdere kristalassen te magnetiseren.	

Tenslotte een overzicht van enkele materiaaleigenschappen:

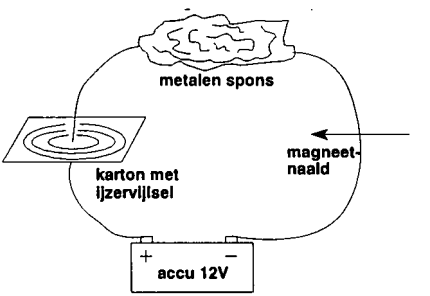
staal/legeringen	*ferrieten*	*zeldzame aarden*
zeer moeilijk bewerkbaar, sterk onafhankelijk van de temperatuur: toepassing tot 400°C,	isolerend	zeer corrosiegevoelig, sterk afhankelijk van de temperatuur: toepassing tot 80°C
cobaltmagneten zijn duur: prijs Co = 100 × Fe = 10 × Ni	goedkoop	zeer duur
	laag rendement magnetisme, maar heel stabiel, ook tegen stoten	grote magneetkracht en hoge stabiliteit bij zware belasting van tegenvelden

3.3 De gesloten elektrische kring

Maakt men met behulp van startkabels en een accu van een personenauto een gesloten kring, dan treedt er pas bij het tegen elkaar aantikken van de twee klemmen effect op: er zijn wat vonken zichtbaar en de kabels worden warm en magnetisch.

Neem nu een metalen spons, een kompasnaald en een karton met ijzervijlsel of een vijftal kleine kompasjes. Sluit de kring via de spons:

- De sponsdraden worden gloeiend heet en smelten of verbranden.
- Het kompas gaat loodrecht op de draad staan.
- Het ijzervijlsel of de kompasnaaldjes, die om de draad heen gezet zijn, vormen concentrische cirkels.
- Verwisselt men de plus en min aansluitingen van de accu, dan draait de kompasnaald om van richting.



Dit zijn de basisfenomenen van een gesloten kring. Men zou de chemische processen in de accu er nog bij kunnen betrekken. Zolang de kring gesloten is blijken de plus- en minplaat van de accu in gewicht af te nemen, terwijl de zure vloeistof steeds wateriger en zouter wordt.

Variaties van de opstelling zijn:

1. Wikkel de draad op tot een spoel. De kompasnaald gaat in en om de spoel in een richting staan alsof de spoel een staafmagneet is. Dit

vormt het principe van de ampèremeter. Bij de draaispoelmeter zit de spoel in de magneet in plaats van de magneetnaald in de spoel. Neemt men een spoel met meer windingen dan is het magneetveld sterker. Een ijzeren kern in de spoel concentreert het magneetveld.

2. Neem een lange dunne draad. Het warmte- en magnetische effect zal dan kleiner zijn. Voor een kring bestaande uit een draad van één metaal geldt het volgende:
   korte, dikke draad → *meer* warmte en magnetisme
   lange, dunne draad → *minder* warmte en magnetisme
   Het warmte-effect is afhankelijk van het materiaal van de draad. In een overal even dikke draad van verschillende metalen wordt koper het minst warm in vergelijking met aluminium, ijzer of de wolfraam gloeidraad van een lamp. Het magnetische effect is onafhankelijk van het materiaal.
3. De serie- en parallelschakeling van weerstanden, lampen e.d. kunnen nu besproken worden:

serieschakeling	*parallelschakeling*
Het magnetische effect is in de hele kring gelijk. De spanning verdeelt zich over de delen, afhankelijk van de eigenschappen dikte, lengte en materiaal. Meer spanning per deel bij lange of dunne draad.	Iedere tak is als een zelfstandige kring te beschouwen. Per tak ontstaat een verschillend magnetisch effect afhankelijk van de eigenschappen dikte, lengte en materiaal. Meer magnetisch effect per tak bij korte of dikke draad.

We willen nu overgaan tot het ontwikkelen van de begrippen spanning, stroom, magnetisch effect, weerstand en hoeveelheid elektriciteit.

De spanning in een accu is een raadselachtig fenomeen. Waar is de elektriciteit gebleven? Plaatst men een elektrolytische condensator van 40.000 pF en een fietslampje in de kring, dan krijgt men kortstondig een elektrisch fenomeen te zien. De condensator creëert voor korte duur het effect van een gesloten kring. Tussen de platen wordt een elektrisch veld opgebouwd. De opbouw van dit veld, van de spanning over de condensator en het magnetisch effect in de kring, verloopt exponentieel afnemend. De lamp gloeit meteen fel op en neemt dan af. Met een ampèremeter in de kring ziet men dat het afnemen van het magnetische effect nog langer duurt. Koppelt men vervolgens de accu af en sluit men de kring van de condensator dan treedt hetzelfde effect op: de ampèremeter slaat naar de andere kant uit, maar vertoont weer een afnemende uitslag en het lampje flitst weer kortstondig op. De condensator maakt het elektrische aspect van de kring zichtbaar. De condensator zorgt namelijk voor een kortston-

dig kringproces. Het karakter van dit proces is het intensief inzuigen van een elektrisch veld. Door de veldverdichting rond de condensatorplaten ontstaat de mogelijkheid om de tendens tot verdwijnen van het elektrische veld te realiseren. Het verdwijnproces van het elektrische aspect vindt overal in de kring plaats. Ook de condensator is zo'n schijnbaar verdwijnpunt. Het elektrische veld tussen de platen werkt de zuigende werking van de condensator tegen en remt het kringproces.

In deel I is het elektrische kringproces beschreven. Dat wordt hier nogmaals gedaan, omdat de gehanteerde rationele beschrijving een andere is dan die volgens het gebruikelijke watermodel dat een analogie is van stromend water met een pomp als aandrijving.

Een batterij heeft een spanning. Als de kring gesloten wordt daalt deze zogenaamde klemspanning. De tegenstelling tussen plus- en minpool wil zich opheffen, zoals we dat ook bij de statische elektriciteit hebben gezien. De spanning onderdrukt het chemische proces in de batterij, dat pas weer actief wordt als de klemspanning ten dele wegvalt. De spanning is een uitdrukking van de mogelijkheid dat een elektrisch/magnetisch proces tot stand komt. Men spreekt daarom ook wel van de potentiaal, of in de aristotelische benaming: de potentie. Alleen de drang is aanwezig; zolang de kring niet gesloten is gebeurt er niets. In de batterij is ook geen aantoonbare elektriciteit of magnetisme aanwezig, buiten de spanning van de polen. Wordt de kring gesloten, dan vindt men in en om de kring magnetische en warmteverschijnselen. Tijdens dit kringproces is er vanuit de verschijnselen geen aanleiding om te stellen dat de batterij voor de elektriciteit zorgt die rondgepompt wordt in de kring. De kring is, met de batterij, de primaire voorwaarde voor het ontstaan van het proces. Het proces is namelijk niet denkbaar zonder kring. Zonder kring treedt er alleen spanning op, die de potentie tot dit kringproces uitdrukt. In paragraaf 3.1 is de tegenstelling beschreven tussen het elektrische veld, dat in proces wil zijn en wil verdwijnen in de ruimte, en het magnetische veld, dat wil verstarren in structuur en tendeert naar verdichting. Bij de gesloten kring ziet men deze tegenstelling in extreme mate. Het magnetisme is als meetbaar vormfenomeen aanwezig en het elektrische is als verdwijnproces werkzaam. Het magnetisme, met zijn concentrische veld, is meetbaar in ampère-eenheden, het elektrische neemt geen vormaspect aan en ontglipt daardoor aan het meetbare.

De fenomenen tonen dat er meer een proces loodrecht op de draad dan in de lengterichting van de draad aanwezig is. Het dynamische elektromagnetisch proces vindt men loodrecht op de draad. Alleen het minimale spanningsverschil met zijn elektrische veldsterkte wordt in de lengterichting van de draad gevonden. Bij de hierboven beschreven condensatorproef wordt de dynamisch wegstrevende elektrische tendens

geconcretiseerd tussen de zuigende platen. De zuigwerking van de condensatorplaten, die feitelijk een onderbreking in de kring vormen, is des te groter naarmate zij dichter bij elkaar staan of een grotere oppervlakte hebben. Dit betekent dat ze qua afstand verwant zijn aan het puntachtige en qua oppervlak aan de verdwijningstendens van het elektrische veld. De dynamiek van het elektrische veld drukt namelijk de polaire structuur van de ruimte uit, die ingebed is in de tegenstelling van punt en oneindig ver vlak.

De duale dynamiek van het magnetische vorm/verdichtingsaspekt - dat concentrisch rond de draad ligt als magnetische veldbuizen - en het proceskarakter van het elektrische dat aan de waarneming grotendeels ontgaat, wordt door het warmteproces bij elkaar gehouden. De warmte is de bemiddelaar en ook het tegenproces van deze duale elektromagnetische tendensen. De hoeveelheid elektriciteit is als begrip, niet direct als fenomeen, de verbindende schakel tussen het elektrische kringproces dat meetbaar is bij de condensator en het magnetische kringaspect dat meetbaar is als amperage in de kring.

condensator	*magnetisme in de kring*
$Q = C \times V$	$Q = I \times t$

Wanneer in een formule een vermenigvuldiging plaatsvindt met de tijd ontstaat een statisch begrip (zie klas 10 over vermogen en energie). De dynamiek van het elektromagnetische kringproces is moeilijk te vatten, maar door bovenstaande berekening wordt een omvattend begrip ontwikkeld, waardoor het hele proces door begin en eind vastgelegd wordt. Het proces zelf - dat wat tussen begin en eind plaatsvindt - is niet in dit begrip aanwezig. Hier ontstaat de vrijheidsruimte voor de mens om een modelgedachte te ontwikkelen van hoe deze hoeveelheid elektriciteit zich verplaatst. De gangbare visie is dingachtig en *in* de ruimte.

Hetzelfde beeld geeft op een andere manier de bemiddelaar warmte weer:

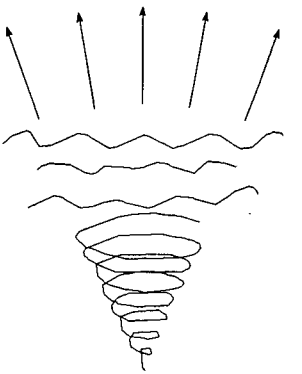
vermogen = $V \times I$ (procesformule)
hoeveelheid warmte = $V \times I \times t$ (een nieuw statisch begrip, omdat met de tijd vermenigvuldigd is).

In beeld kunnen de tendensen als volgt uitgebeeld worden:

ontstaan en vergaan van elektriciteit,
ongrijpbaar als één en al proces zonder vorm

bemiddelende warmte

verdichtende magnetische vorm



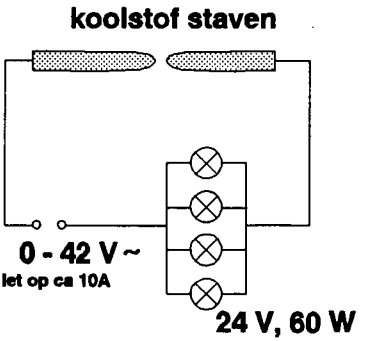
3.4 De vonk en de vonkenzender

Vonkenverschijnselen treden in de volgende situaties op:

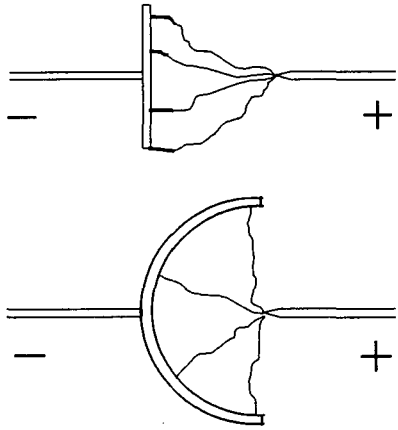
1. bij het verbreken van een elektrische kring;
2. bij het verdwijnen van elektriciteit.

De vonk is een fenomeen dat optreedt aan grensvlakken. Onderbreekt men een elektromagnetische kring, dan treedt een vonk, een vlamboogachtig effect op. Bij een elektrisch lasapparaat is deze sterk ultraviolette vlamboog goed te zien. Door het kortstondig sluiten van een kring bij het lassen ontstaat het elektromagnetische effect en vervolgens kan men de kring verbreken en zal de vlamboog standhouden. De wegspattende vonken bestaan uit verbrandend, gloeiend metaal, terwijl de blauwig paarse vonk tussen de contactplaatsen de elektromagnetische gasverbinding in de gesloten kring vormt. Ook bij een stopcontact of lichtschakelaar kunnen deze vonken optreden. Een mooie vlamboog kan men maken door in een kring twee koolstofstaven (bijvoorbeeld uit een batterij) op te nemen en als beveiliging tegen een te hoog amperage een aantal lampen in serie of parallel op te nemen.

Deze proef zonder lampen geeft bij circa 20 A een gigantisch lichteffect. Hierop was de vroegere koolspitslamp gebaseerd.

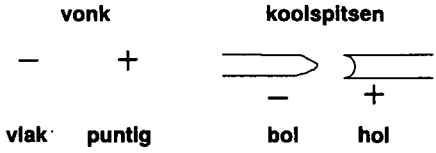


De vonkverschijnselen bij de elektriseermachine en de rhumkorff-inductor laten heel mooi de tegenstelling tussen de eigenschappen van de plus- en de minpool van de elektriciteit zien. De vonkbrug zal bij de rhumkorff over de minpool heen en weer bewegen en bij de pluspool in een punt geconcentreerd blijven. Men kan aan dit karakteristieke verschil tegemoet komen door de pluspool puntig en de minpool vlak te maken.



De vonkbrug is als geheel zeer beweeglijk, echter aan de pluspool dun en star en aan de minpool dik en beweeglijk. Draait men de aansluiting van de polen om, dan zal er ten eerste minder snel een vonkbrug ontstaan en ten tweede zal een vonkbrug op de rand van de vlakke en op de zijkant van de puntige elektrode gaan staan. Ook ontstaat er een sterkere lichtmantel om de vonk heen van de omtrek van de plaat naar de punt toe. Dit is alleen in het donker goed te zien en komt het beste tot zijn recht als men voor de ene pool een halve bol en voor de andere een punt als centrum heeft.

Een glimlampje op een rhumkorff of elektriseermachine dat aan de ene kant aan een elektrode vastzit en aan de andere kant vlakbij de elektrode geplaatst is, zal aan de kant van de minpool oplichten en bij de pluspool donker blijven.

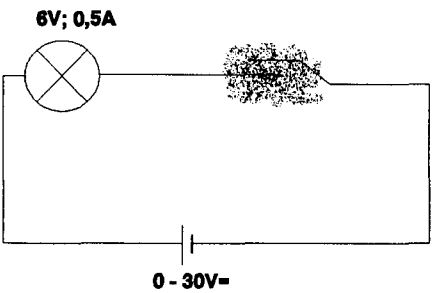


De beschreven vonkverschijnselen en de vervorming van de uiteinden van de koolstofstaven van een koolspitslamp hangen nauw met elkaar samen. De negatieve elektriciteit bewerkstelligt aan de elektrode een omhullend effect, terwijl de positieve elektriciteit als het ware een put slaat, waardoor deze elektrode wordt uitgehold. Het indringend puntige van de pluspool en het omhullend ronde van de minpool komen ook in de temperatuur van de elektroden tot uitdrukking. De anode (pluspool) is altijd heter dan de kathode (minpool) vanwege de ruimtelijke concentratie van de vonkverschijnselen. Naarmate de minpool heter is ontstaat de vlamboog gemakkelijker.

Er kunnen nog enkele fenomenen gezocht worden die het verschil tussen de plus- en minpool laten zien, zoals het edisoneffect. Om een gloeidraad ontstaat een negatief elektrisch veld, terwijl de vaste gloeiende draad positief is. Ook bij de batterij en bij wrijvingselektriciteit treedt een overeenkomstig verschijnsel op. De pool die het minste chemisch verandert is positief en bij wrijven is de hardste plaat, die het minst door wrijven verandert, eveneens positief. Ook in een onweerswolk is de bovenkant, de ijskant van de wolk, positief ten opzichte van de onderkant. Dit brengt met zich mee dat de hele atmosfeer positief elektrisch is ten opzichte van de negatieve aarde. Samenvattend:

positief	*negatief*
puntvlak,	bol
donker	licht
hard	zacht
edel	onedel
gloeidraad	vrije veld eromheen
ijs, hagel	wolkomgeving

Wanneer men proefjes doet met elektriciteit en magnetisme is men samen met de leerlingen geneigd zich te fixeren op de direct zichtbare en tastbare verschijnselen en te veronderstellen dat deze de kern van het verschijnsel betreffen. Dat dit maar zeer ten dele waar is bewijst de volgende verrassende proef.

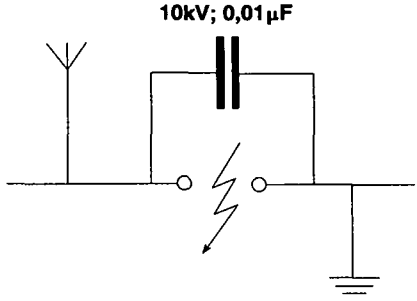


Maak op een stuk triplex (zodat alles makkelijk verplaatst kan worden) een gesloten kring met een regelbare gelijkspanningsbron van 0-30 V, een lampje en een hoopje vetvrij ijzer- of nikkelvijlsel (met ether spoelen en de ether op filtreerpapier laten verdampen). Leg het vijlsel en de draaduiteinden zo neer dat de lamp net niet gloeit. Knijp het vijlsel eerst samen en klop het daarna los door op het triplex te tikken. Draai nu aan de elektriseermachine met losgekoppelde leidse flessen. Wanneer de eletriseermachine veel kleine vonkjes geeft zal het lampje gaan branden. De afstand tussen vijlsel en elektriseermachine mag ongeveer een meter zijn.

Men kan de opstelling nog verbeteren door het nikkelvijlsel (een dubbeltje vijlen en vetvrij maken in ether) in een glazen buisje te doen

met links en rechts twee blank geschuurde draden. Zo'n buisje wordt een 'coherer' genoemd.

De elektriseermachine zonder leidse flessen wordt voorzien van twee draden, één als antenne en een tweede wordt verbonden met de waterleiding als aarde. Zet eventueel een condensator (0,01 μF, 10 kV) parallel aan de elektriseermachine. In plaats van een elektriseermachine kan men ook een rhumkorff- of van de graaff-generator nemen. De coherer zal nu op grotere afstand reageren, maar dit blijft een gevoelig proefje dat goed voorbereid moet worden. Zet eventueel de antennedraad dicht bij de coherer. Toch heeft men volgens dit principe de eerste zenders gebouwd, waarmee men morseseinen van Engeland naar Amerika zond.



De proef lukt met een antenne van circa 3 m en een AM transistorradio ineens veel beter. Waar men ook gaat staan in de school of daarbuiten, overal knettert de luidspreker van de radio door alle zenders heen. Een gelijksoortig effect kennen de leerlingen van het inschakelen van een lamp. Op een niet goed ontstoorde radio hoor je dan ook een geknetter. Hoe hoger de frequentie, des te beter het zendereffect. Enkele krachtige vonken, die langzaam na elkaar komen, geven dan ook geen effect op de radio.

Bij de verbeterde vonkenzenders werd de coherer door de klepel van een bel steeds losgeklopt en was dan klaar voor de volgende morsecode. De vonkenzender heeft ruim 20 jaar gefunctioneerd. Het grote probleem was echter dat er maar één zender tegelijkertijd gebruikt kon worden, omdat een coherer op alle elektromagnetische velden reageert. Het zenden met een vonkenbrug uitgaande van een bepaalde frequentie en het afstemmen van een coherer hierop was een moeilijk op te lossen technisch probleem. De bandbreedte van een zender bleef vrij groot.

Enige historische feiten. Tussen 1885 en 1889 ontwikkelde Hertz een oscillator met een rühmkorffinductor. Het bereik was ongeveer 50 m. In 1896 ontwikkelde Marconi een zender met antenne met een bereik van 2 km. In 1906 werd de eerste vonkenzender gebouwd die het gesproken woord kon overbrengen. Het afstemmen van een resonantiekring (spoel en condensator, zie paragraaf 3.7) van de vonkenzender met hoog-frequent

generatoren heeft veel technisch vernuft aangesproken. Rond 1900 werd de radiobuis uitgevonden, waarmee in 1913 de bestaande spreekzenders, met hoogfrequent generatoren, konden worden verbeterd, zodat deze al snel geheel verdrongen werden. De frequenties lagen in deze beginperiode in het gebied van de lange golven. In 1906 bereikte men met de beste machines slechts 100.000 Hz. In 1925 kon men met radiobuiszenders al 10 MHz bereiken (korte golf). Deze zenders hadden een veel lager vermogen met veel beter resultaat. Na 1948 vinden er ten opzichte van de voorgaande jaren in korte tijd ongelofelijke technische verbeteringen plaats door de uitvinding van de transistor. Vanaf 1900 bestond de draadloze telefonie en binnen 10 jaar waren er radiozenders, die niet ontstonden vanuit culturele of politieke behoeften, maar omdat de techniek er de mogelijkheid toe bood. Deze tendens dat de techniek de ontwikkeling in belangrijke mate bepaalt typeert de 20e eeuw in hoge mate.

De elektriciteit laat in zijn gestiek beelden zien van de ruimte. Het is het beeld van de kosmos van punt en oneindigheid, maar nu niet in hun samenhang maar in hun absolute tegenstelling. Ook bij de eerder beschreven karakteristieken van de plus- en de minpool komt de dualiteit van punt en bolvorm tevoorschijn. Elektriciteit scheurt als het ware het ruimte-continuüm uiteen in een absolute tegenstelling. Het elektrische verdwijnproces vindt in een kring vooral plaats bij lage frequenties. Hoe hoger de frequentie, hoe makkelijker het elektrische verdwijnproces zich verplaatst naar de ruimte en de verdwijnende elektriciteit en het behoudende magnetisme loskomen van de drager. Het verdwijnende, vrije elektromagnetische veld induceert in alle geleiders spanningen en wervelstromen (=magnetisme en warmte).

De tegenstelling elektriciteit en magnetisme werd in paragraaf 3.1 getypeerd door proces en vorm, beweging en verstarring. Elektriciteit toont in zijn proceskarakter ook de tegenstelling tussen beweging en verstarring. Magnetisme heeft als zodanig deze tegenstelling niet in zich, tussen de noord- en zuidpool is geen kwalitatief verschil. Magnetisme is helemaal geen veld met polariteiten, maar is één gesloten wervelveld, dat vastigheid en vorm creëert. Magnetisme onttrekt zich zoveel mogelijk aan de ruimte en creëert ruimtelijk vaste vormen. Elektriciteit spreekt zich duidelijk uit in de ruimte, maar scheurt deze als het ware uiteen in twee absoluut tegengestelden. Dit uiteenscheuren gebeurt natuurlijk niet volledig, maar partieel. De tendens in deze richting is er echter wel.

Bij de mens gaat het er niet om dat hij hard of zacht moet zijn. Bij de mens gaat het juist niet om een gespleten houding. Wel draagt hij aan de elektromagnetische natuurkrachten verwante psychische tendensen in zich. Zo kennen we de geprogrammeerde, gemaakte mens, die zijn

levenssituatie vastzet door uiterlijke zekerheid biedende vormen en die zich in macht en zekerheid wil uitleven; dit kunnen we de magnetische tendens noemen. De elektrische tendens wordt vertegenwoordigd door de mens die opgaat in paradijselijke waanvoorstellingen, in dweperij, alcohol en drugs en een niet geïntegreerd seksueel driftleven.

Zoals licht in de natuur verwant is aan het innerlijk van de mens en aan zijn denkkracht en warmte verwant is met het voelen en het doorvoelde denken, zo zijn elektriciteit en magnetisme verwant aan andere menselijke zieleneigingen, die vooral deze eeuw tot uiting komen, zoals egoisme, verslving, ideologie. Het dubbelgangerthema, de duistere zijde van de mens, is pas deze eeuw in de literatuur geïntroduceerd. Het één is geen gevolg van het ander, maar de natuur en de menselijke ontwikkeling staan in directe samenhang met elkaar. Elke menselijke ontwikkeling opent een nieuwe blik op de natuur.

3.5 Elektromagnetische fenomenen in gas- en vacuümbuizen

Alvorens tot de beschrijving van de fenomenen in de gasbuis over te gaan zullen eerst enkele gezichtspunten gegeven worden die voor de begripsvorming van belang zijn. Wil men namelijk deze verschijnselen vanuit een fenomenologische invalshoek benaderen, dan merkt men dat men al snel geneigd is om de traditionele opvattingen over bewegende elektronen die door draden en gassen gaan erop toe te passen.

In 1995 verscheen een boek van A. Ploum getiteld "In de spiegel van het universum". Hierin worden aardse, kosmische en biologische fenomenen met elkaar in verband gebracht die een verrassende overeenkomst vertonen, zoals schedelbotten en de continenten, eencellig plankton en supernova's, de zonnecorona en de zonnebloem, enz. Ploum legt dus een relatie tussen het leven en uiterlijke verschijningsvormen. Een uitspraak van hem luidt dan ook: "God is een kopieermachine". Ook in onze beschouwingen zijn we al meermalen de verwantschap tussen het innerlijk van de mens en de uiterlijke natuur tegengekomen. In de menselijke ziel leeft ook een onbewust, ontoegankelijk gebied. Hier liggen potenties om tot de edelste, meest individuele daden te komen, maar tevens huist er in dit onbewuste een lagere natuur, waar egoïsme, agressie en de grootste onmenselijkheid uit tevoorschijn kunnen komen. Alles wat in positieve zin uit een mens voortkomt ligt niet kant en klaar in zijn ziel te wachten, maar kan tot ontplooiing komen wanneer de omstandigheden gunstig inwerken op de wilsintenties. Anderzijds kan zich in ongunstige omstandigheden ook zijn lagere natuur doen gelden. Men zegt wel dat men

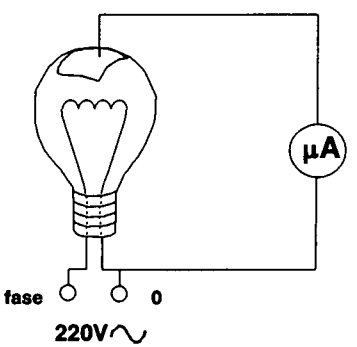
bepaalde dingen "onder de knie" moet krijgen, opdat er geen dingen gebeuren die men niet wil.

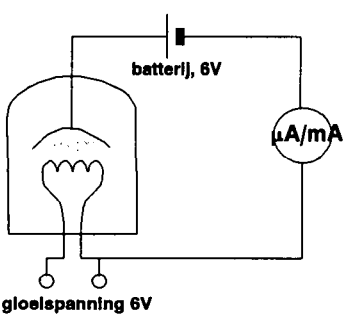
De elektromagnetische fenomenen zijn verwant aan die aspecten van het zieleleven waar de beschreven uitschieters uit kunnen voortkomen. Om dit te gaan zien moeten we de fenomenen niet beschrijven vanuit de gedachte van reeds aanwezige, bewegende elektriciteit die door botsen en duwen verandering teweegbrengt. We willen deze verschijnselen bekijken als dynamische toestanden, die steeds opnieuw ontstaan en vergaan. Zij ontstaan zoals we zullen zien in extreem polariserende omstandigheden, zoals hoge elektrische spanningen en grote verschillen tussen koude en warmte.

Inleidend op proeven met gasbuizen noemen we nogmaals enige fenomenen die het verschil tussen positieve en negatieve elektriciteit zeer duidelijk tot uitdrukking brengen.

1. De *vonkenbaan* bij de rühmkorffinductor en teslatransformator: de pluskant van de vonkenbaan is compact en ontspringt het liefst aan kanten of punten; de minkant versproeit, is beweeglijker en blijft het liefst op een vlak heen en weer dansen. Een glimlampje glimt op aan de minkant.
2. Het *edisoneffect*: een gloeiend voorwerp of gas is positief elektrisch en heeft een negatief veld om zich heen. Dit kan men aan de volgende verschijnselen onderzoeken:

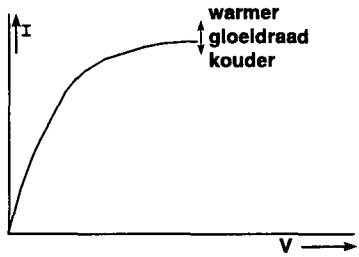
a. Een kaarsvlam bij een geladen elektriseermachine houden.
b. Een gloeilamp beplakken met een stukje aluminiumfolie en met een microampèremeter de stroom meten (neem hiervoor een elektronische voltmeter, daarmee kan men stromen meten vanaf 10^{-12} A). Beweeg een statisch elektrische plaat van bovenaf naar de lamp. De ampèremeter zal bij een positieve plaat sterker en bij een negatieve plaat helemaal niet uitslaan.





c. Een speciaal voor dit doel vervaardigde lamp (zie laatste figuur vorige pagina). Als de bovenkant van de lamp negatief is, dan is er geen uitslag. Is de batterij zó aangesloten dat de bovenkant van de lamp positief is, dan slaat de μA meter extra uit.

Verhoogt men deze positieve spanning, dan zal de stroom/het - magnetisme tot een maximale waarde stijgen. Maakt men de gloeidraad warmer of kouder, dan ligt dit maximum respectievelijk hoger of lager. De buis is vacuüm, dus zonder gloeidraad is er geen kringeffect mogelijk. Een gloeiende, stralende gloeidraad maakt dus een kringeffect in één richting mogelijk.



Het vrije negatieve elektrische veld rond een gloeidraad creëert een verdwijnruimte voor het kringproces. Zonder batterij is de gloeidraad in een vacuümruimte de spanningsbron die een kringeffect mogelijk maakt. Het edisoneffect is verwant aan de effecten bij een condensator, maar terwijl daar het veld gebonden is aan de platen, ontstaat er rond een gloeidraad een vrij elektrisch veld in de van warmte doorstraalde ruimte. In een met gas gevulde buis komt het veld minder gemakkelijk tevoorschijn. Het zit dan gevangen op of direct rond het grensvlak van de gloeidraad en het gas. Een plaat met een sterk positief veld kan dit veld van de gloeidraad bevrijden en de ruimte intrekken.

Het ontstaan van een warmte doorstraalde ruimte en een vrij elektrisch veld kan als een duaal proces worden beschouwd, namelijk als een verijlings- respectievelijk verdichtingsproces, die tot de bovennatuur respectievelijk de ondernatuur behoren.

gloeidraad in vacuüm

- met warmte doorstraalde ruimte (bovennatuur)
- vrij, negatief elektrisch veld t.o.v. aan de gloeidraad gebonden positieve elektriciteit (ondernatuur)

Hetzelfde treedt op bij wrijving waarbij, naast de wrijvingswarmte, bij de harde plaat positieve en bij de zachte plaat negatieve elektriciteit ontstaat. Bij de gloeidraad is de stralende warmte echter veel vrijer dan de stof-gebonden wrijvingswarmte. Het negatieve veld dat nu ontstaat is ook ruimtelijk vrij geworden. Ongebonden zijn, ruimtelijk vrij, ligt helemaal in het karakter van de elektriciteit.

3. Het *fotoëlektrische effect* kan hier besproken worden.

4. Een *vlamboog* ontsteekt des te beter naarmate de minpool (de kathode) heter is. Bij teveel afkoeling van de kathode, bijvoorbeeld als deze van metaal is, dooft de vonk. Een gloeiende kathode laat daarentegen een vlamboog spontaan ontstaan, ook zonder de elektroden tegen elkaar aan de tikken. Hierbij speelt het ruimtelijk vrijkomen van het negatieve elektrische veld een belangrijke rol. De combinatie van een warme en een koude elektrode is zelfs in het verleden gebruikt als vlamboog-gelijkrichter.

5. Bij *onweer* is de naar de aarde toegekeerde wolkzijde normaal gesproken negatief, terwijl de aarde positief is. In geval van bliksem ontstaan er eerst "scheuren" in de ruimte, zowel vanuit de pluskant, de aarde, als vanuit de minkant, de wolk. Daarbij laat het scheurenpatroon aan de minkant een veel meer gedifferentieerde vertakking zien dan aan de pluskant. Is er een doorlopend pad tussen wolk en aarde gevormd, dan volgt de hoofdontlading die aan de minkant, de wolk, dan ook veel meer uitlopers heeft.

Op grond van de besproken verschijnselen kunnen de leerlingen een duidelijk beeld krijgen van de karakteristieke verschillen tussen de plus- en de minkant bij vlamboog- en vonkfenomenen. Voor zover deze verschillen verborgen blijven kan men ze zichtbaar krijgen door middel van de gasbuisproeven met verlaagde gasdruk. Samenvattend:

- Het ontstaan van elektriciteit toont alleen de tegenstelling tussen de plus- en de minelektriciteit. Zo laat de elektroscoop wel de tegenstelling zien tussen de polen, maar nog niet het kwalitatieve verschil. Ook bij de condensator is er nog geen kwalitatief verschil tussen de polen waarneembaar.
- Zowel bij galvanische als bij wrijvingselektriciteit gaat men uit van kwalitatief tegengestelde materialen, bij wrijving van een harde en een zachte stof, bij een batterij van een edel en een onedel metaal. De verwantschap tussen de stoffelijke verschillen hard-zacht en edel-

onedel enerzijds en de verschillen tussen de elektrische polen anderzijds is in hoofdstuk 2 besproken.

- Bij het vergaan van de elektriciteit kunnen ook de kwalitatieve verschillen tussen de elektrische polen zichtbaar worden. Zo laat het kringeffect in gassen zien dat de min-elektriciteit ruimtelijk vrij kan komen van de kathode, terwijl de positieve elektriciteit altijd min of meer gebonden blijft. Ook in vloeistoffen komt dit karakteristieke verschil tussen min- en plus-elektriciteit naar voren, bijvoorbeeld in een koolstof-zink batterij. Hierbij is de koolstof (+) de blijvende pool, terwijl het zink (-) in oplossing gaat.

In het kort zullen de belangrijkste fenomenen die zich tussen de polen voordoen bij afnemende druk hier ten behoeve van de aansluitende beschouwing besproken worden*. We gaan hierbij uit van een buis gevuld met lucht.

1. Bij een druk van ongeveer 0,1 bar bewegen knetterende linten langs de glaswand. Is de anode cirkelvormig dan raken de linten de rand. Bij de kathode is veel meer beweging te zien en vertakken de linten zich willekeurig en raken het oppervlak van de kathode ook op een willekeurige plek.
2. Bij afnemende druk wordt de linten dikker. Midden in de buis ontstaat een stabiel dun lichtlint. Het geknetter is grotendeels voorbij. Het licht bij de pluskant lijkt op één plek gefixeerd te zijn, terwijl het lint aan de minkant over de kathode heen en weer springt.
3. Aan de pluskant is een sterk lichtende rode wolk zichtbaar. Deze lichtzuil wordt vaal van kleur bij afnemende druk. Rondom de kathode ontstaat een violet lichtkussen dat zich bij afnemende druk uitbreidt. Ertussen is geen licht te zien: de zogenaamde donkere ruimte van Faraday.
4. De positieve lichtzuil wordt valer en kleiner en krijgt tegelijkertijd een gelede schijfstructuur. De kleur is sterk afhankelijk van het gas. Het mineffect heeft drie aspecten:

   - violet lichtkussen op de kathode. Deze kleur is onafhankelijk van het gas;
   - de donkere ruimte van Faraday;

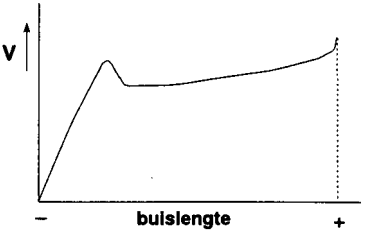
* De proeven met gasbuizen zijn goed beschreven in: *Geluid, elektriciteit en magnetisme* van R. van Romunde en: *Wesenzüge der Elektrizität* van R. Cantz.

- een schijnsel ontstaat rond de kathode, het zogenaamde negatieve glimlicht. De kleur is min of meer complementair aan die van het positieve licht. Enkele voorbeelden:

	argon	*waterstof*	*helium*	*stikstof*
negatief glimlicht	donkerblauw	lichtblauw	groen	blauw
positieve lichtzuil	diep rood	roze	violet	rood

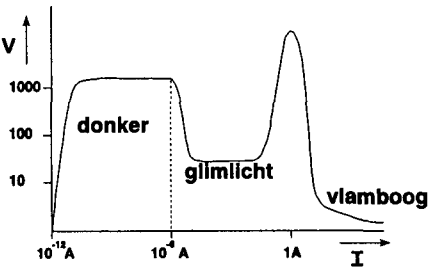
5. Wordt de luchtdruk nog lager, dan vervaagt alles en wordt de ruimte van Faraday groter. Men krijgt de indruk dat het negatieve glimlicht de positieve lichtzuil wegduwt. Dit is heel goed te zien wanneer de spanning flink gevarieerd wordt. Bij hogere spanning gebeurt hetzelfde als bij lagere druk: de verschijnselen aan de minkant breiden zich uit ten koste van de lichtzuil aan de pluskant.
6. Is er in de buis nauwelijks nog iets zichtbaar, dan gaat het glas tegenover de kathode groen oplichten. Deze plek kan met behulp van een magneet gevarieerd worden.

Extra waarnemingen:
- Heeft men een gasbuis waarbij de anode en kathode zich niet in elkaars verlengde bevinden, dan zullen de beschreven effecten aan zowel de plus- als minkant gewoon optreden en zich onafhankelijk van elkaar loodrecht op hun pool uitbreiden.
- In de kring meet men gewoon een stroom/magnetisch effect, die/dat tot fase 4 toe- en daarna afneemt.
- Meet men het spanningsverloop in de buis, dan blijkt dit niet helemaal evenredig met de lengte te zijn. Ten eerste is er een vrij hoge doorslagspanning nodig om de buis in oplichtende toestand te brengen. Daarna kan met een veel lagere spanning worden volstaan (denk aan de TL-buis met starter en smoorspoel). Voordat de doorslagspanning is bereikt, is er wel een minimaal kringeffect meetbaar dat daarna echter miljoenen malen groter wordt. Het spanningsverloop in de buis langs de lengterichting verloopt als volgt:
  Bij de kathode is er bij iedere druk een vrij groot spanningsverschil te constateren, terwijl het spanningsverschil in de positieve lichtzuil gering is. Het spanningsverschil bij de kathode is afhankelijk van het gas en van het materiaal van de kathode, maar niet van de druk. Zie voorbeelden.



	argon	*waterstof*	*helium*	*stikstof*
aluminium	100 V	170 V	140 V	300 V
ijzer	130	200	150	360

- Afhankelijk van het kringeffect is er op de kathode een grotere of kleinere lichtvlek te zien. Bedekt deze lichtvlek het hele vlak van de kathode, dan is het amperage groot genoeg geworden voor een vlamboog. Als tegenproces neemt de benodigde spanning tussen kathode en anode nog flink toe tot waarden die in de buurt van de doorslagspanning liggen. In een grafiek kunnen de verschillende effecten gezamenlijk weergegeven worden:



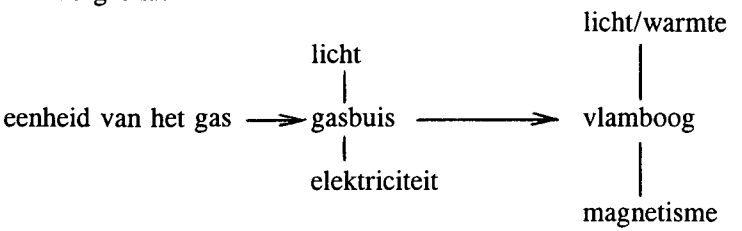
Om het gasbuiseffect te krijgen is er behalve een grote spanning een zeker minimaal amperage nodig om de doorslag naar de nieuwe fase te laten plaatsvinden. Wil men overgaan tot het vlamboogeffect, dan is er opnieuw een spanningsbarrière, die alleen door een drastisch toegenomen kringeffect kan worden gepasseerd. Meestal creëert men een vlamboog door via het aanstippen van de elektroden de barrièrespanning te ontlopen. Is er eenmaal een vlamboog ontstaan, dan is het benodigde spanningsverschil direct aan het oppervlak van de kathode ongeveer gelijk aan de kleine anodespanningsval bij het gasbuiseffect. De vlamboog is verwant aan de positieve lichtzuil bij het gasbuiseffect, met zijn kleine spanningsverschil. Bijzonder is nog dat de vlamboog zich bij de anode concentreert op een klein vlakje, terwijl de kathode het snelst verdampt.

We zullen in het vervolg een aantal invalshoeken kiezen om de karakteristieken en wetmatigheden van de naar voren gebrachte fenomenen te ontdekken.

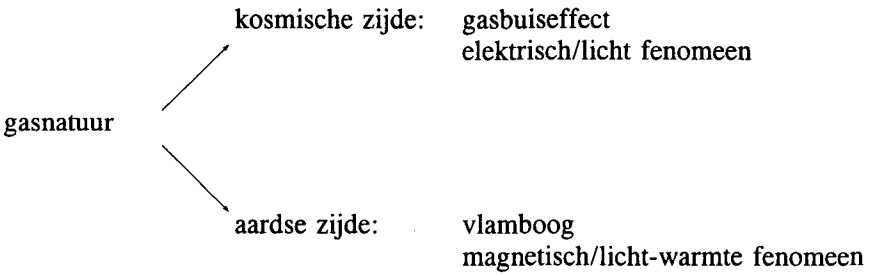
In de *V-I* grafiek komt duidelijk naar voren dat het allereerste zeer zwakke begin verloopt volgens de wet van Ohm: spanning en amperage zijn evenredig. Het gas gedraagt zich als een gewone, maar wel zeer slechte geleider. De polariserende tendens die in een gesloten kring plaatsvindt, heeft in dit allereerste begin nog geen grip op het gas. Het gas vertegenwoordigt in hoge mate een toestand van eenheid. Alle gassen zetten evenveel uit en het molair volume van alle gassen is gelijk. Het gas verzet zich tegen de polariserende werking die van het elektromagnetisme

uitgaat. De eenheid wordt uiteindelijk uiteengescheurd in een elektrisch, verdwijnend-oplossend proces en een magnetische gefixeerde vorm. Het gas dat van zichzelf uit grenzeloos is, kan dit dualisme niet laten ontstaan zonder meegetrokken te worden in het verdwijnproces van de elektriciteit, zodat een lichtend gas ontstaat. De spanning daalt dan bij toenemend amperage. Wanneer het gas de dualiteit van grote elektrische spanning en geringe stroom/magnetisme niet meer kan weerstaan, klapt zijn weerstand in en geeft het zich als het ware geheel aan de verdwijnende tendens van het elektrische proces over. Daarmee is het gasbuiseffect vooral een elektrisch proces, dat het kwalitatieve verschil tussen de positieve en negatieve pool in optima forma laat zien. Het magnetisch effect is hier verstopt aanwezig.

Bij verdere stroomtoename treedt er een tweede spanningsbarrière op, waarna een nieuwe doorbraak mogelijk wordt in het ontstaan van het vlamboogeffect. De weerstand blijkt nu grotendeels weg te vallen, de stroom wordt heel groot. De grootst denkbare tegenstelling tussen fel licht met een zeer hete vlam en een krachtig magnetisme anderzijds treedt op de voorgrond:



Vanuit een ander gezichtspunt bezien is het gasbuiseffect een kosmisch-atmosferisch fenomeen, omdat het verwant is aan het poollicht dat zich in een ijle atmosfeer op zo'n 200 km hoogte voordoet, terwijl de vlamboog ook bij hoge druk uitstekend functioneert en meer verwant is aan de zon of de aarde, vanwege het samengaan van licht, warmte en een sterk magnetisch effect:



Terwijl de vlamboog sterk kringgebonden is, manifesteert de elektriciteit in de gasbuis zich ongebonden in de vacuümruimte. Het plus- en min-effect zijn dan ook niet op elkaar georiënteerd. De ruimte van Faraday bij de kathode geeft hetzelfde beeld als het edison- en fotoëlektrische effect. Het vrije elektrische veld en het elektrische gas zijn beide onzichtbaar. In de ruimte van Faraday komen ze het sterkst naast elkaar voor, terwijl ze in de positieve lichtzuil op elkaar inwerken en het lichtende gas ontstaat.

Ook het elektrische veld van de aarde, waarbij de aarde min is en de plus in de atmosfeer niet gelokaliseerd aanwezig is, geeft een prachtige analogie met de gasbuis: de negatieve pool is daarin de vaste pool en de positieve pool wordt vertegenwoordigd door de hele lichtzuil. De spanningsval in de positieve lichtzuil is minimaal, zodat men de hele zuil als een verlengde anode zou kunnen typeren. De kathodeval is naast de breakdown heel karakteristiek voor dit vrije elektrische fenomeen, zoals de aarde dat is voor de atmosfeer eromheen.

Zoals bij de gesloten kring de magnetische structuur tevoorschijn gezogen wordt door de verdwijnende elektriciteit, zo komt aan de minpool (niet uit de minpool) door de kathodeval het min-effect tevoorschijn. Wanneer het elektrodemateriaal en het gas meer 'open' zijn, wanneer dus gemakkelijker de elektrische ondernatuur tevoorschijn kan komen, is een lagere spanning voldoende om dit te realiseren. Dit is het geval wanneer bijvoorbeeld de kathode warm is, of met bepaalde stoffen bestreken, zoals bariumoxide of strontiumoxide, of bij de fotocel, waarvan het materiaal heel oxidatiegevoelig moet zijn.

De vrije negatieve elektriciteit komt dus tevoorschijn aan een grensvlak dat als het ware 'open' gezogen wordt door een elektrisch veld (de kathodeval). De positieve lichtzuil is als het ware een verlengde aarde. Hij wordt omschreven als een plasma, dat wil zeggen dat de ruimtelading neutraal is, terwijl het gas toch in een elektrische toestand is en de spanningsval klein en gelijkmatig.

Het plus- en mineffect bij lage druk kunnen ook nog ieder voor zich bestudeerd worden:

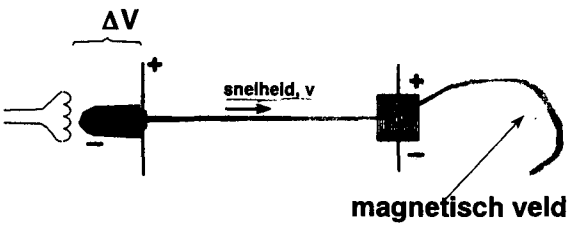
min-effect	*plus-effect*
Reageert op zwak magneetveld.	Reageert alleen op sterk magneetveld (> 1000 maal sterker)

De afbuiging is loodrecht op het magneetveld, maar is bij de plus- en de minpool in onderling tegengestelde richting. Het plus-effect buigt op dezelfde manier af als een draad in een magnetisch veld.

De ruimte-uitbreiding van het veld gaat met verschillende snelheid:

grote snelheid $\approx$ ½c	lagere snelheid $\approx$ 0,01c
Het is negatief elektrisch, net als een gewreven zachte plaat, en buigt dus af in de richting van een positieve pool.	Het is positief elektrisch, net als een gewreven harde plaat, en buigt dus af in de richting van een negatieve pool.

Het pluseffect, doorgaans anodestraling of kanaalstraling genoemd, wordt technisch toegepast bij gasbuislampen en de massaspectrometer. Het min-effect, ook wel kathodestraling genoemd, wordt technisch toegepast in de oscilloscoop, de televisie en de röntgenbuis. Dit zijn vacuümbuizen waar door een gloeidraad vrije negatieve elektriciteit ontstaat. Dit veld wordt dan vervolgens versneld door een plusplaat met opening en tenslotte elektrisch of magnetisch afgebogen.



Deze situatie is als volgt kwantitatief uit te werken.
De snelheid van de kathodestraling kan gemeten worden. Er geldt:

$$\Delta V \propto v^2$$

Tussen de condensatorplaten wordt het veld parabolisch afgebogen. De sterkte van het veld en de tijd die het veld tussen de platen is bepalen de dwarsverplaatsing. Er geldt:

$$s \propto E \cdot t^2 = E \cdot \frac{l^2}{v^2}$$

waarin: s = dwarsverplaatsing
E = veldsterkte in Volt per meter
l = breedte van de condensatorplaten
v = veldsnelheid

Wil men van deze twee evenredigheden vergelijkingen maken, dan moeten er evenredigheidsconstanten ingevoegd worden:

$$v^2 = c_1.\Delta V \qquad \text{waarbij} \qquad c_1 = 2{\cdot}17{\cdot}10^{10}\ \frac{\mathrm{m}^2}{\mathrm{Vs}^2}$$

en

$$s = c_2 E t^2 \qquad \text{waarbij} \qquad c_2 = \frac{1}{2}{\cdot}17{\cdot}10^{10}\ \frac{\mathrm{m}^2}{\mathrm{Vs}^2}$$

Voor de cirkelvormige afbuiging met straal r in een magneetveld geldt de volgende experimentele relatie:

$$v \propto Br$$

waarin: v = veldsnelheid
B = magnetische veldsterkte
r = straal van de baan

Als vergelijking wordt dat:

$$v = 17{\cdot}10^{10} Br$$

Er geldt dus de volgende relatie tussen de versnelspanning ΔV en de magnetische inductie B:

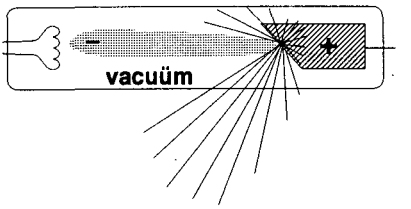
$$\Delta V = \frac{1}{2}{\cdot}17{\cdot}10^{10}(Br)^2$$

Omdat B, v en r loodrecht op elkaar blijven staan is de baan cirkelvormig.

De waarde $17{\cdot}10^{10}\ \frac{\mathrm{m}^2}{\mathrm{Vs}^2}$ is karakteristiek voor vrije elektriciteit.

Men ziet dat berekeningen mogelijk zijn zonder enig model van deeltjes en massa's toe te passen. Puur vanuit de gemeten relaties worden de formules gevonden. Het model gaat schuil in de constante die de relatie tot een vergelijking maakt. Aan alle bekende modelbegrippen ligt een fenomeen ten grondslag. Dit fenomeen in de voorstelling opnemen is veel belangrijker dan de geïsoleerde modelvoorstelling als feitelijkheid te proclameren. Deze manier van beschrijven geeft een solide basis om bijvoorbeeld de radioactieve verschijnselen te behandelen.

Aansluitend kan de oscilloscoop gedemonstreerd en besproken worden. Ook de röntgenbuis kan nu ter sprake worden gebracht. De buis moet een grote onderdruk hebben en voorzien zijn van een gloeidraad. Het effect treedt pas op bij hoge versnelspanningen tussen kathode en anode. De anode wordt dan plaatselijk zeer warm. Een zeer klein gedeelte van het vermogen, ongeveer 2%, laat aan de anode een nieuw effect ontstaan. W.C. Röntgen noemde dit effect in 1895 X-stralen. Ze zijn niet elektrisch of magnetisch en reageren niet op uitwendige velden. Verder straalt het effect vrijwel overal doorheen. Hoe hoger de versnelspanning, des te dieper zal deze straling in voorwerpen doordringen. Men spreekt dan van harde röntgenstralen. Met röntgenstraling kan men foto's maken, omdat bepaalde platina- en zinkzouten onder invloed van deze straling flueresceren. Zo'n fluorescerende plaat belicht dan weer een fotogevoelige plaat. Terwijl rond de gloeidraad vrije elektriciteit ontstaat, wordt deze bij de anode abrupt vernietigd en ontstaat er röntgenstraling en zeer veel warmte. Op aarde worden processen meestal snel opgenomen in het geheel en ebben verschillen snel weg. Dit is in hoge mate het geval met stofgebonden warmteverschillen. Röntgenstraling daarentegen wil zijn eigen natuur sterk handhaven en laat zich niet gemakkelijk teniet doen. Het kan daarom als een sterk geëmancipeerd en geïsoleerd fenomeen worden beschouwd.



Röntgenstraling werkt vernietigend in op levende organismen. Men kan zich alleen tegen deze straling beschermen door voldoende afstand te houden. Hij gaat dwars door je heen en tast de levensprocessen aan, terwijl daarnaast warmte ontstaat. De kans op het ontstaan van kanker wordt vergroot. Kanker in het organische gebied heeft dezelfde karakteristiek als de röntgenstraling in de anorganische natuur. Het wil zelfstandig blijven en zich niet laten opnemen in het geheel. Kanker wordt wel een koude ziekte genoemd, omdat het warmteorganisme van het lichaam er niet helend op kan werken. Röntgenstraling tast dus de eenheid van het organisme aan, waardoor ongecontroleerde wildgroei mogelijk is. Met de huidige apparatuur, waarbij heel kortstondig minimale intensiteiten gebruikt worden, is de aantasting gering, hoewel zoveel mogelijk bescherming, bijvoorbeeld door een loden scherm of schort, nodig blijft. Lood heeft de kleinste halveringsdikte voor de doorlating van röntgenstraling en wordt daarom als afschermend materiaal gebruikt.

Wat is nu eigenlijk de natuur van röntgenstraling? We bekijken de fenomenen en vergelijken deze met andere.

- De straling ontstaat aan een oppervlak door sterk versnelde negatieve elektriciteit.
- De verdwijnende negatieve elektriciteit laat in hoofdzaak warmte ontstaan, zodat een grote röntgenbuis flink gekoeld moet worden of maar heel kort kan worden gebruikt, en voor slechts ongeveer 1% röntgenstraling produceert.
- De straling straalt alzijdig uit, maar de ruimtewerking is niet homogeen. (Schuin) naar voren is de intensiteit het grootst.
- Scherend contact met een materiaal geeft in lichte mate richtingverandering.
- De straling werkt vernietigend op het leven in, veroudering treedt op en de kans op wildgroei van cellen neemt toe. De vitaliteit en regeneratievermogen van cellen neemt af na bestraling.

Vergelijkbare fenomenen:

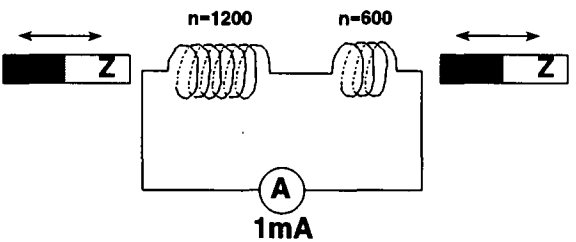
- Hoogfrequente elektrische velden gaan ook door veel stoffen heen en breiden zich, afhankelijk van de antennevorm, uit in de ruimte.
- Het fenomeen van de richtingverandering bij scherende inval hangt nauw samen met het verschijnsel spiegeling. Ieder oppervlak gaat voor het oog namelijk spiegelen wanneer je er scherend langs kijkt.
- Bij het gesloten kringproces is er een direct verdwijnproces in relatie tot het oneindige.

Voorlopig kan röntgenstraling getypeerd worden als een heel sterk polariserend effect tussen leven en dood, waar de natuur zich door middel van warmte krachtig tegen verzet, maar waar hij na het ontstaan nauwelijks greep meer op heeft. Röntgenstraling bewerkstelligt een scheiding tussen het levende en datgene wat door de zintuigen gegeven is. Het leven zou op aarde niet werkzaam kunnen zijn met röntgenstraling, dood en misvorming zouden hun intrede doen. De beste bescherming tegen röntgen is afstand bewaren, niet omdat het eenzijdig is voor de ziel, maar omdat het lichaam ontoegankelijk wordt voor het leven en daarmee onbruikbaar voor ziel en geest.

Andere toepassing van anode- en kathodestraling, zoals diode, triode, lampen en de massaspectrometer zullen in hoofdstuk 4 besproken worden.

3.6 Inductie en zelfinductie

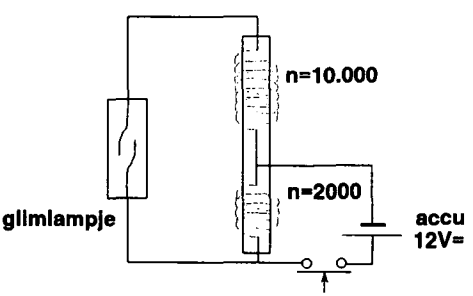
Faraday ging van de uit het leven gegrepen gedachte uit dat alle fenomenen samenhangen en op elkaar inwerken. Wanneer één verschijnsel verdwijnt of afneemt, moet een ander ontstaan of toenemen. Ontstaan en vergaan in een wederzijdse wetmatige afhankelijkheid typeert de zoektocht van Faraday. Vandaar zijn vermoeden dat wanneer bij het verdwijnen van elektriciteit magnetisme en warmte ontstaan, dit ook omgekeerd moet kunnen. Zo ontdekte hij de inductie en het thermokoppel. Enkele demonstratieproeven:



1. Beweeg de magneet in spoel 1 en daarna in spoel 2. De ampèremeter slaat alleen uit als de magneet beweegt en slaat de andere richting uit als de magneet in de andere richting bewogen wordt of de windingsrichting omgekeerd wordt. De grootte van de uitslag loopt op bij het toenemen van drie factoren:
   - de snelheid waarmee de magneet beweegt;
   - het aantal windingen van de spoel;
   - de sterkte van de magneet (doe de proef nogmaals met twee magneten naast elkaar, namelijk N tegen N en vervolgens N tegen Z, om te laten zien dat het veld zich verstopt).

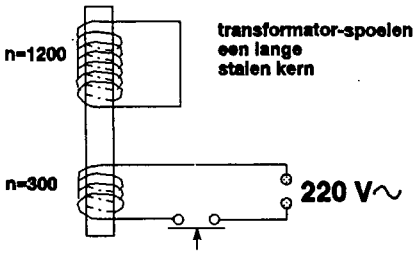
2. Wentel de magneet rond zijn as voor de spoel met of zonder ijzeren kern. Er ontstaat een inductieëffect in de spoel. Hiermee wordt de dynamo in herinnering gehaald, zoals deze in de 9e klas besproken werd.

3. Maak de spoel met 2000 windingen elektromagnetisch door hem op een accu aan te sluiten en onderbreek vervolgens deze kring. Het glimlampje zal nu aan de onderkant oplichten: dit zal

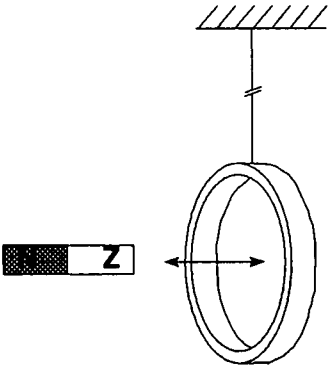


dus de minkant zijn. Deze proef maakt de relatie tussen de elektromagneet en de inductiespoel duidelijk. De inductiespanning is tegengesteld aan het elektromagnetische proces dat hem laat ontstaan. Het principe van de bobine, de rhumkorffinductor en het schrikdraad is hiermee herhaald.

4. De transformatorspoelen dienen door een lange ijzeren kern verbonden te worden. Spoel 1 zorgt voor een wisselend magneetveld, spoel 2 is de inductiespoel. Zolang de kring van deze spoel open is ontstaat er alleen inductiespanning. Sluit men spoel 2 kort, dan zal deze bij verticale opstelling boven spoel 1 gaan zweven! Spoel 1 en 2 zijn dus steeds gelijk gericht, beide N of beide Z. De inductie werkt als een tegenproces en wil iedere verandering minimaliseren. Neemt men in plaats van spoel 2 een ijzeren ring, dan wordt deze de lucht in geschoten.



5. Een gesloten aluminium ring wordt vrij opgehangen. Beweegt men de magneet naar de ring toe, dan wordt deze meegenomen ofwel "weggeduwd". Beweegt men de magneet uit de ring, dan wordt deze weer meegenomen ofwel "vastgehouden". Men noemt dit de wet van Lenz: Als een geleider zich in een veranderend magneetveld bevindt, ontstaat er om deze geleider een magneetveld dat de verandering tegengaat.



Zijn ring en magneet uit elkaar, dan willen ze dus ook uit elkaar blijven (de magnetische inductie van de ring vormt een tegenproces ten opzichte van de magneet); zijn ze samen, dan willen ze elkaar niet loslaten. Steeds tendeert het magnetisme ernaar de bestaande situatie te handhaven door tegenprocessen op te roepen die elke verandering teniet doen. Op psychologisch vlak kan men een vergelijkbaar verschijnsel waarnemen: een relatie tussen bijvoorbeeld echtgenoten die onder druk staat of dreigt te breken, kan als tegenproces een zich aan-

passend of onderschikkend gedrag oproepen, een poging om (eventueel ten koste van de eigen ontplooiing) de bestaande situatie te handhaven.

6. Sluit men een spoel met veel windingen en een grote goed gesloten ijzeren kern aan op een gelijkspanning, dan ziet men de ampèremeter slechts langzaam naar de maximale waarde toekruipen. Zonder kern is dit heel anders. Houdt men de uiteinden 1 en 2 tussen duim en wijsvinger, dan krijgt men een treffend schrikdraadeffect. Ook licht een glimlampje, vooral bij het uitschakelen, mooi op. Het sterke spoeleffect remt bij het inschakelen het ontstaan van een maximaal kringeffect door het tegenproces van de magnetische inductie.

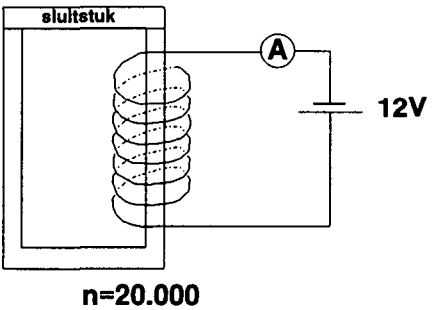
7. Aansluitend kan men nog de transformator, de inductieverwarming, het elektrisch lassen en de hoogspanning behandelen.

3.7 Spoel en condensator

In deze paragraaf zullen de effecten van wisselspanning op een kring met een spoel, een condensator, of met een combinatie van beide na elkaar besproken worden.

Het in- en uitschakeleffect bij een spoel

1. Het inschakeleffect:

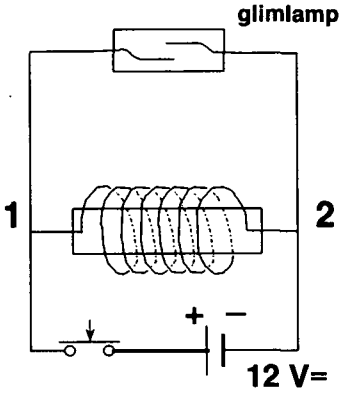


Een spoel van ca 20.000 windingen met een goed sluitende kern met geslepen raakvlakken wordt aangesloten op 12 V gelijkspanning. De ampèremeter komt maar langzaam tot zijn maximale waarde, terwijl de spanning over de spoel meteen 12 V is. Dit effect is des te sterker wanneer de spoel veel windingen heeft en van een gesloten ijzeren kern voorzien is. Het lage amperage is ook ervaarbaar aan het feit dat het sluitstuk van de kern niet onmiddellijk vast zit.

In de bovenstaande situatie werkt het magnetisme dat ontstaat remmend op het ontstaan van een kringeffect. Spanning en magnetisme/stroom nemen hier niet zoals bij een enkelvoudige draad rechtevenre-

dig toe. Tijdens het inschakelproces loopt de sterkte van het magnetisme achter op de spanning, die meer mogelijk zou kunnen maken.

2. Het uitschakeleffect:



Een spoel van ca 20.000 windingen met een goed sluitende ijzeren kern wordt parallel met een glimlampje aangesloten op een spanning van 12 V. De batterij geeft een magnetisch kringeffect. Onderbreekt men de kring, dan ontstaat blijkens het oplichten van het glimlampje een hoge inductiespanning, waarbij kant 1 van de spoel negatief wordt. Om de polariteit van het magneetveld te bepalen hanteert men de kurkentrekkerregel: draait men in de kring van plus naar min, dan schroeft de kurkentrekker in de richting van het magneetveld, dat wil zeggen in de spoel van zuid naar noord. De inductiespanning van de spoel, die nu mede-spanningsbron wordt, wil het magnetisch kringeffect in stand houden. Ook hier blijft het magnetisme (stroom) achter bij de veranderende spanning. De spanning is steeds de potentiële aanleiding tot het kringproces.

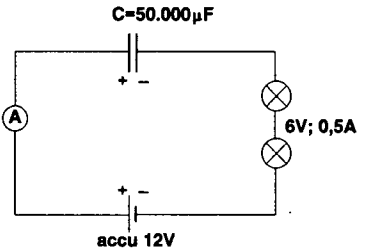
Het in- en uitschakeleffect bij een condensator

De werking van de condensator kan men heel toegankelijk demonstreren met behulp van de elektriseermachine van Whimshurst. Schakel de leidse flessen uit en draai de machine. De elektrische influentie die ontstaat drukt zich uit in de spanning tussen de polen. De afstand tussen de polen is een maat voor de spanning die weerstaan kan worden. De kracht van de vonk is een maat voor de hoeveelheid elektriciteit. Maakt men aan beide polen een vlakke plaat of bijvoorbeeld een pan vast, dan neemt het oppervlak toe. Het geheel blijkt nu niet zo snel op spanning te komen, maar daar tegenover staat dat de vonk des te krachtiger is. Brengt men de platen naar elkaar toe met een dik stuk plastic ertussen, dan wordt de vonk steeds krachtiger en neemt de vonkfrequentie af. De hoeveelheid elektriciteit per vonk neemt toe en bereikt een maximum bij een minimale afstand tussen de platen. De platen worden dan door het veld tegen elkaar aan gezogen. De tegenstelling tussen positieve en negatieve elektriciteit wil zich opheffen en geeft een steeds grotere veldverdichting tussen de platen.

Een condensator kan men ook gebruiken bij heel lage spanningen, men kan dan de platen heel dicht bij elkaar brengen. Bij de elektrolytische

condensator wordt een oxidelaagje als isolerende laag toegepast. Let op de vaste plus en min-aansluiting. Kies voor onderstaande proef een elektrolytische condensator van circa 50.000 μF/30 V.

In- en uitschakeleffect:



Sluit men de kring, dan zullen de lampjes meteen fel oplichten en dan weer langzaam uitdoven. De ampèremeter zal tot een maximale waarde uitslaan en dan langzaam teruglopen. Meet men gelijktijdig de spanning over de condensator dan blijkt deze langzaam toe te nemen. Is de stroom/het magnetisme maximaal, dan is de spanning minimaal en omgekeerd. Onderbreekt men de kring en sluit men deze na enige tijd opnieuw, dan blijkt er niets te gebeuren. Sluit men de kring dan echter zónder accu, dan lichten de lampjes opnieuw op. De ampère-meter slaat dan de andere kant uit. De condensator wordt in deze situatie blijkbaar een tijdelijke spanningsbron, waarbij een omgekeerd kringeffect ontstaat. In eerste instantie laat de condensator het kringproces toe: het elektrische verdwijnproces vindt dan ook tussen de platen plaats. Komt de condensator op spanning, dan werkt deze spanning als een tegenproces, waardoor het proces geremd wordt. Het inschakelmoment heeft daarom het meeste proceskarakter. Tevens valt op dat het in- en uitschakeleffekt even sterk, maar gespiegeld verlopen, waarbij de grootste activiteit direct na het in- en uitschakelen optreedt. Dit in tegenstelling tot de spoel, die niet op gang wil komen en bij het uitschakelen de kring juist als een laatste stuiptrekking nog in stand wil houden.

We zien dus de volgende karakteristieken:

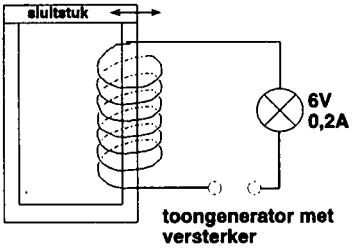
condensator
Grote dynamiek en directheid, maar de condensatorkring kan tijdelijk onderbroken worden. Het proces kan dan even later vervolgd worden.

spoel
Geremde dynamiek en traag verlopend. Het proces heft zich "stuiptrekkend" op zodra de kring onderbroken wordt.

Wisselspanning bij een spoel

Introduceer de frequentiegenerator, bijvoorbeeld met een hoogohmige luidspreker in een kring of een lampje dat aan- en uitgaat. Gebruik in de proefopstelling een spoel met afneembare ijzeren kern. Let op:

draai de frequentiegenerator steeds terug op nul wanneer men de kring verbreekt. Dit in verband met de inductie-effecten die de versterker kunnen beschadigen.



Proeven:

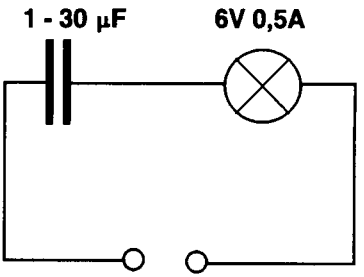
1. Sluit de kring met spoel maar zonder kern. Stel de frequentie in op 200 Hz. De lamp zwak laten gloeien. Als nu vervolgens de ijzeren kern in de spoel wordt gedaan en het sluitstuk van de kern aangebracht wordt, zal de lamp uitgaan.
2. Varieer nu de frequentie en zoek naar de maximale frequentie waarbij de lamp nog net niet gloeit.
3. Varieer het aantal windingen. Bij meer windingen gaat de lamp al bij een lagere frequentie uit en is de maximale frequentie dus lager. Meer windingen of meer ijzer geeft een groter spoeleffect en dus meer remming van het kringeffect.
4. Zelfs een spoel met weinig windingen en zonder kern werkt bij hoge frequenties nog sterk remmend op het kringeffect.

Wanneer de frequentie relatief laag is, heeft de kring de beste gelegenheid om tot een krachtig effect te komen, omdat het tegenproces alleen kan werken tijdens veranderingen (het zogenaamde naijlen). Komen de in- en uitschakelmomenten snel achter elkaar, dan is de remmende werking van de spoel groter. De spoel heeft een tendens tot statische situaties. Iedere verandering vermindert het kringeffect, omdat de spoel zich verzet tegen verandering en dus een lange aanlooptijd nodig heeft om zich aan te passen aan een verandering. Conclusie: *Bij lage frequenties is er een sterk kringeffect; hoge frequenties worden door de spoel in de kring niet toegelaten.*

Wisselspanning bij een condensator

Kies een condensator bijvoorbeeld van een elektromotor van 20 μF, 380 V. De veel kleinere capaciteit is gelegen in de veel grotere afstand tussen de platen waar in dit geval een papier of kunststoffolie tussen zit. (Elektrolytische condensatoren zijn niet geschikt voor wisselspanning). Laat eerst de lamp zonder condensator branden en voeg daarna de condensator toe. Zet de frequentiegenerator op nul wanneer de kring verbroken wordt.

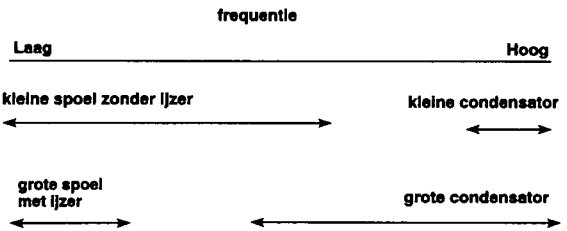
1. Bij lage frequentie zal de lamp niet branden. Afhankelijk van de capaciteit van de condensator gaat de lamp bij hogere frequentie gloeien.
2. Hoe kleiner de capaciteit hoe hoger de frequentie waarbij de lamp gaat gloeien.



toongenerator met versterker

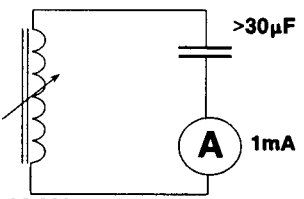
Een condensator functioneert dus in een kring het best wanneer de spanning verandert. Omdat hij slechts kortstondig een kringeffect in stand kan houden, levert een condensator de beste bijdrage aan dat kringeffect bij relatief hoge frequenties. Conclusie: *Hoge frequenties geven een sterk kringeffect; lage frequenties maken een sterk kringeffect onmogelijk.*

Vergelijking van de spoel en de condensator:



Spoel en condensator samen

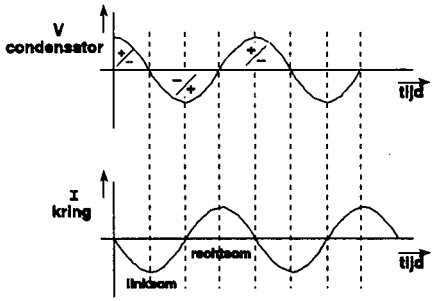
De spoel van 20.000 windingen moet voorzien zijn van een zware, goed sluitende ijzeren kern. Schuif het sluitstuk iets opzij. Maakt men nu de ijzeren kern met een magneet magnetisch, dan slaat de meter een aantal keren heen en weer uit. Trekt men de magneet er af, dan slaat de wijzer weer enige keren heen en weer uit. Veel sterker is dit effect als we de kring even verbreken, de condensator op 12 V spanning brengen en vervolgens de kring weer sluiten. De ampèremeter slaat dan vele malen flink naar links en rechts uit.



n=20.000 met gesloten kern

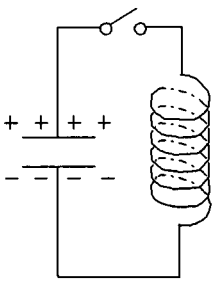
- Bij een maximale spanning over de condensator is het magnetische effect minimaal en omgekeerd.

- Maximale spanningsvariatie over de condensator geeft een maximaal kringeffect en minimale inductie aan de spoel; minimale spanningsvariatie over de condensator geeft een minimaal kringeffect en maximale inductie.
- De samenwerking van spoel en condensator wordt sterk geremd door de warmteontwikkeling in de spoel, waardoor een gedempt proces ontstaat. Zou men op het juiste moment de condensator steeds op spanning brengen, dan zou het proces zijn amplitude behouden.



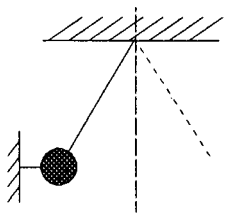
- De in de proef gebruikte combinatie van spoel en condensator levert een frequentie van ongeveer 1 Hz. Bij een kleinere spoel of condensator ligt de frequentie hoger.

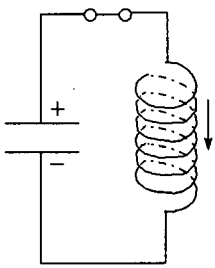
Het verloop van het proces vertoont een duidelijke gelijkenis met het mechanische proces van de slingerbeweging. Men zou in analogie kunnen spreken van de 'elektrische slinger' en de overeenkomstige fasen als volgt naast elkaar kunnen plaatsen:



Beginsituatie: De condensator is op spanning, de schakelaars zijn open, er is geen stroom.

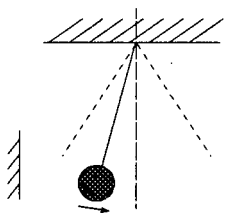
Beginsituatie: De kogel is uit zijn evenwichtsstand gebracht, hij wordt vastgehouden door een touwtje, hij beweegt niet.

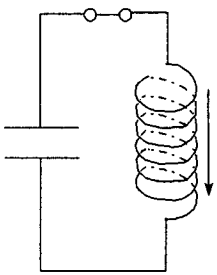




De schakelaars zijn gesloten, de spanning over de condensator neemt af, er is een stroom in de kring.

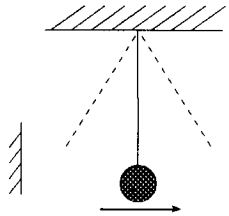
De kogel is losgelaten, hij gaat naar zijn laagste punt toe, de kogel heeft een snelheid gekregen.

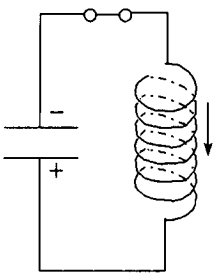




De condensator is spanningsloos, de stroom in de kring is maximaal. Deze stroom blijft nu behouden: *zelfinductie* van de spoel.

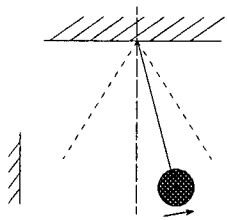
De kogel is op z'n laagste punt, de snelheid van de kogel is maximaal. De kogel behoudt zijn snelheid: *traagheid* van de massa.

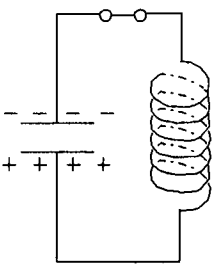




Er komt opnieuw (tegengestelde) spanning op de condensator, de stroom in de kring wordt steeds minder.

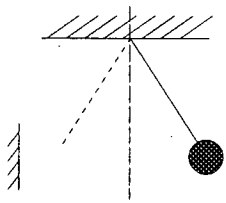
De kogel komt weer steeds hoger, zijn snelheid neemt af.





De condensator is weer geheel op spanning, er is geen stroom meer.

De kogel is weer op z'n hoogste stand, zijn snelheid is nul, hij staat stil.



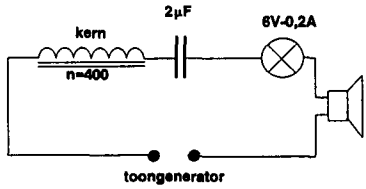
Het kringeffect bij een bepaalde combinatie van spoel en condensator hangt af van de volgende factoren:

1. de lengte en dikte van de kring;
2. het materiaal waaruit de kring bestaat;
3. de vorm die de draad of het draaduiteinde heeft:
   - Spoel: Compact, alle draden liggen geïsoleerd naast elkaar, maar zijn doorlopend verbonden. De cirkelstructuur van de windingen is sterk in zich gesloten. De weekijzeren kern benadrukt de compactheid nogmaals. Het volume van de spoel speelt een belangrijke rol.
   - Condensator: Het uiteinde van de draad is een groot vlak geworden van als het ware een zeer dikke draad. De verbinding is echter

verbroken. Van doorslaggevende betekenis is de oppervlakte van de condensatorplaten. De capaciteit wordt echter ook bepaald door de afstand tussen de platen en de eigenschappen van de tussenstof. Populair gezegd: de verhouding tussen de elektrische spanning en het magnetisme wordt bepaald door "draadjes en plaatjes".

Resonantie

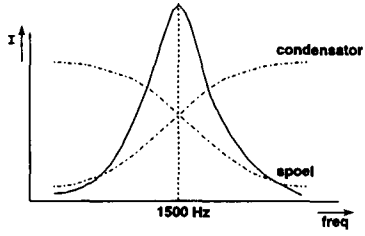
Bij *serieschakeling* van spoel en condensator zal de lamp tussen bepaalde frequenties opgloeien, namelijk bij die frequenties waar én de spoel én de condensator ieder voor zich de lamp zouden laten oplichten.



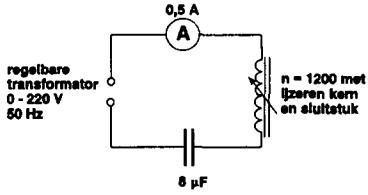
Variaties:

1. Breng in de kring een luidspreker aan.
2. Verander het spoeleffect door de kern te sluiten.
3. Neem meer windingen of een grotere condensator.
4. Sluit tijdens de proef spoel of condensator kort om het overlappende frequentiegebied te vinden.

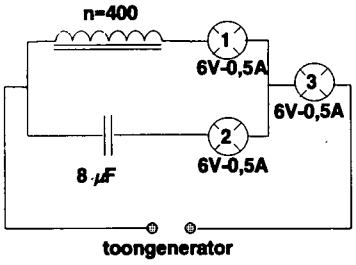
Een zware spoel en een kleine condensator laten geen kringeffect toe. Zijn spoel en condensator goed op elkaar afgestemd, dan zal de lamp tijdens het kortsluiten van spoel of condensator zwakker gaan branden! In een goed afgestemde *LC*-kring werken spoel en condensator precies in het ritme van de wisselspanning op elkaar in. Het elektromagnetische effect blijft dan als het ware in de kring hangen: er heerst resonantie. De proef kan ook zonder frequentiegenerator worden uitgevoerd.



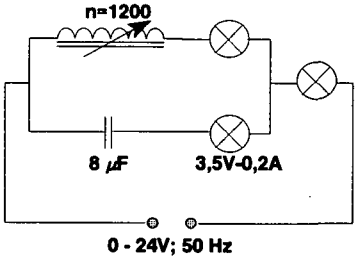
Zoek de maximale uitslag van de ampèremeter door het sluitstuk van de ijzeren kern te verschuiven. Met nevenstaande proefopstelling werd bij 90 V een maximaal amperage van 300 mA gemeten. Door nabij het resonantiepunt 50 Hz) van deze *LC*-kring de spoel of condensator kort te sluiten neemt de uitslag van de ampèremeter af.



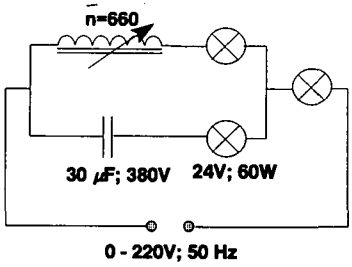
Parallelschakeling van spoel en condensator:



Zónder spoel en condensator zal lampje 3 het felste branden en lampje 1 en 2 samen even sterk als 3. Mét spoel en condensator zullen bij lage frequentie lampje 1 en 3 gloeien, bij hoge frequentie zullen 2 en 3 gloeien, bij tussenliggende frequentie zullen de lampjes 1 en 2 samen even sterk branden als 3, maar bij één frequentie zal lampje 3 uitgaan en zullen de lampjes 1 en 2 maximaal branden! Deze frequentie is afhankelijk van spoel en condensator en ligt in bovenstaande proefopstelling bij circa 400 Hz. Het kringeffect blijft dan, zoals eerder gezegd, in de spoel/condensator-kring gevangen en sluit zich af. De kring als geheel heeft daardoor een schijnbaar grotere weerstand, de wisselspanningsweerstand.



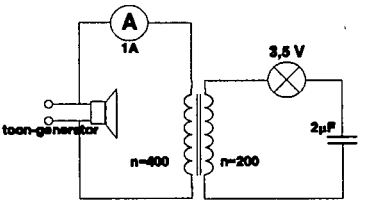
Deze proef kan ook bij 50 Hz uitgevoerd worden. In de proefopstelling hiernaast werden lampjes van 3,5 V en 0,2 A gebruikt.



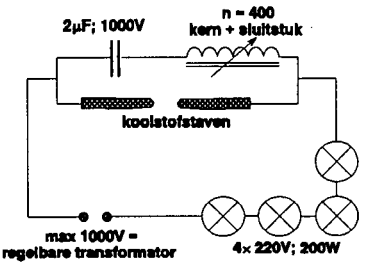
Met grote fitting lampen van 24 V en 60 W lukt de proef ook prachtig. Zoek ook in deze opstelling het resonantiepunt door het sluitstuk van de spoelkern te verschuiven.

Nog enkele variaties:

- Een samengestelde proefopstelling:
Bij één bepaalde frequentie zal het lampje oplichten. De luidspreker maakt de frequentie hoorbaar.

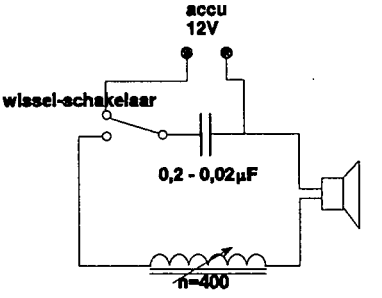


- De afgestemde vonkenbrug:
Vroeger werd een vonkenbrug met een bepaalde frequentie (van belang voor het afstemmen van de vonkenzender) als hiernaast aangegeven uitgevoerd. Deze opstelling is te riskant om in de klas toe te passen.



Met gelijkspanning lukt deze proef veel beter dan met wisselspanning. Wanneer de kring niet gesloten is, staat de ingestelde spanning over de uiteinden van de koolstofstaven. De vier lampen zijn om kortsluiting bij het aanslaan van de koolstofstaven (door middel van de geïsoleerde statieven) te voorkomen. Men hoort nu een toon, die kan worden veranderd door het sluitstuk te verschuiven of de kern in en uit te schuiven. Meer spoeleffect geeft een lagere toon.

- De toongenerator:
Beweeg de kern van de spoel heen en weer en bedien tegelijkertijd de wisselschakelaar, dan is er door de luidspreker een toon goed hoorbaar. Kiest men een kleinere spoel of condensator, dan zal de frequentie toenemen.



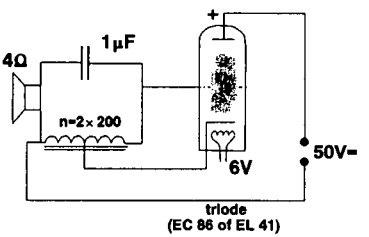
Door een hele kleine condensator met een spoel zonder kern te combineren zal de resonantiefrequentie zeer hoog worden. Bij de proef met de vonkenzender is reeds duidelijk geworden dat snelle spanningsvariaties zó op een kring werken, dat het elektrische veld loskomt en niet meer alleen als elektromagnetisch proces aan de kring gebonden is, maar als elektromagnetisch veld in de ruimte verdwijnt. Dit effect treedt zowel bij hoge als bij lage spanningen op, van doorslaggevend belang is de frequentie.

Een belangrijke vraag, die ook de gemoederen rond de eeuwwisseling bezighield, is: hoe houdt men zo'n trillingskring in stand? Hoe

maak je een schakelaar die tenminste 100.000 maal per seconde in- en uitschakelt? Dit zal in de volgende paragraaf besproken worden. De toepassing van de vacuümradiobuis en later van de transistor heeft de ontwikkeling van de radio, televisie en radar technisch mogelijk gemaakt.

3.8 Zender en ontvanger

In deze paragraaf zullen alleen toongeneratoren en zenders met triodes worden behandeld. De bespreking van transistorschakelingen en de fenomenologie van halfgeleidermaterialen valt buiten het bestek van dit boek. Nadat trillingskring en gasbuizen als zelfstandige onderwerpen zijn besproken kan men deze fenomenen nogmaals behandelen aan de hand van de toongenerator en de zender. We bespreken eerst de toongenerator.

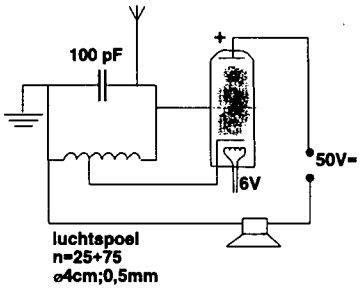


De 50 V kring door de gasbuis zal, in fase met de resonantiekring, een groot of klein amperage/magnetisch effect hebben. Hierdoor zal het inductie-kringeffect in de *LC*-kring voldoende intensiteit behouden. De polariteitswisselingen aan de condensator vormen tevens de stuurspanning voor het rooster van de triode. De luidspreker kan ook in de kring van de triode opgenomen worden, omdat de gelijkspanning die daar werkzaam is wisselingen vertoont van dezelfde frequentie als in de *LC*-kring. Door een ijzeren kern in de spoel te bewegen verandert de toonhoogte. Door een kleinere spoel of condensator te nemen verkrijgt men een hogere toon.

Bij een veel kleinere keuze van spoel en condensator treden zendereffecten op. De frequentie van de *LC*-kring zal dan namelijk nog verder toenemen, zodat de elektromagnetische velden loskomen van de kring en zich met grote snelheid oplossen in de ruimte. Zoals we eerder hebben gezien kan de kring bij hoge frequenties het verdwijnproces van de elektriciteit steeds minder via het magnetisme aan zich binden. De hoge frequenties komen sterk tegemoet aan de eigenlijke natuur van de elektriciteit: beweeglijkheid, vergaan, oplossen in de ruimte en vrijkomen van de drager.

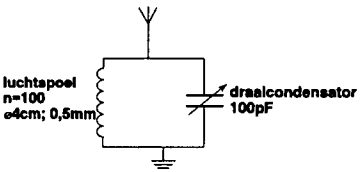
De spanning over de condensator wordt aan de roosterkant van een lange draad (2 á 3 m) als antenne voorzien en aan de andere kant geaard. Met een draagbaar radiootje kan men nu de zender opzoeken (middengolf,

circa 800 Khz). Zonder antenne en aarding is de reikwijdte enkele meters, maar met beide kan men de hele school doorlopen en zelfs daarbuiten nog ontvangen. Neemt men in de draad van de min-pool een koolstofmicrofoon van een telefoon op, dan kan de zendergolf gemoduleerd worden (AM). Spreken en zingen is dan duidelijk op de draagbare radio te horen. Het zoeken van de juiste afstemming gaat het gemakkelijkst door met een potlood op de microfoon te kloppen.

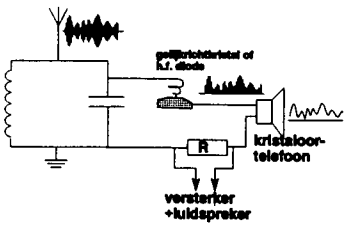


Dit is een zeer attractieve proef. Er worden hier, zelfs bij lage spanning, effecten in de ruimte gecreëerd die dwars door muren en deuren gaan. De elektro-magnetische vervuiling van de atmosfeer en de werking hiervan op de mens kunnen aansluitend worden besproken. Verdere literatuur over proefbeschrijvingen vindt men in oudere boeken en in oud documentatiemateriaal van leermiddelenfirma's.

Aansluitend kan men nog een eenvoudige kristalontvanger maken om de werking van de radio te bespreken. Maak een vergelijkbare trillingskring als bij de zender. Antenne en aarding moeten aangebracht worden, anders is er op enige afstand van de zender geen ontvangst. De hoogfrequente inductiespanning die past bij de *LC*-kring van de ontvanger blijft in de resonantiekring hangen, alle andere inductiespanningen in de antenne verdwijnen direct via de spoel of de condensator naar de aarde. Voor deze ene hoogfrequente inductiespanning heeft de *LC*-kring als het ware een hoge weerstand en blijft de antenne van de condensator op spanning. Het is de gemoduleerde zendfrequentie die op de condensatorplaten komt te staan.



Door de gemoduleerde wisselspanning gelijk te richten kan de luidspreker de modulatie volgen. De wisselspanning van 800 kHz heeft op de luidspreker nauwelijks effect, het kristal van het oortelefoontje is daar te traag voor. De gelijkgerichte, relatief langzame variaties van de draaggolf zijn wel hoorbaar in het oortelefoontje.



Via een weerstand van enkele kΩ kan ook een versterker aangesloten worden, zodat iedereen in de klas de ontvangst kan horen.

Op deze wijze één zender ontvangen lukt overigens vrijwel altijd, maar of men meerdere zenders kan ontvangen hangt sterk af van de kwaliteit van de spoel. Een goede spoel maken is niet zo eenvoudig. Door middel van terugkoppeling is de selectiviteit te vergroten, maar dat voert voor de 11e klas mogelijk te ver.

4. TOEPASSINGEN

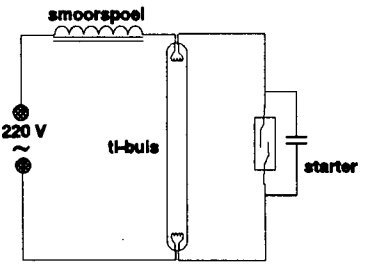
4.1 Toepassingen van de gas- en vacuümbuizen

De gasbuislamp

De eenvoudigste gasbuislamp is een neongasbuisje, veelal gebruikt voor lichtreclames. Het buisje is in serie geschakeld met een weerstand, zodat de werkspanning net boven de doorslagwaarde ligt. Een gas is altijd weinig elektrisch actief, maar bij doorslag neemt de weerstand af, waardoor de spanning over de buis daalt. Het gas licht dan roodachtig op. Bij een heliumgasmengsel is dit geel.

De TL-buis

De TL-buis is gevuld met een zogenaamd startgas onder lage druk en kwikdamp, alsmede enige kwikdruppeltjes. Deze lamp geeft vooral ultraviolet licht, maar door de fluorescerende poederlaag kunnen verschillende kleurtinten verkregen worden.



De gasbuis laat het elektrische doorslagproces pas toe bij tamelijk hoge spanning (ca 700 V), maar daarna is er geen verzet meer. Deze hoge startspanning wordt verkregen door middel van een met ijzer verzwaarde inductiespoel. Schakelt men de kring met spoel, starter en gloeidraden in, dan zal de starter de kring na enige seconden onderbreken, waardoor de spoel een hoge inductiespanning geeft die de weerstandsbarrière doorbreekt. Dat dit reeds bij een spanning van 700 V gebeurt hangt samen met de vrije elektriciteit (edisoneffect) die door de gloeidraden in de buis ontstaat. Is de weerstandsbarrière doorbroken, dan zorgt de smoorspoel middels zijn wisselspanningsweerstand (zelfinductie) voor een acceptabel kringproces. De starter bestaat uit een gasbuisje met twee bimetaal elektroden, die iets van elkaar staan, maar bij een spanning van 220 V vlamboogcontact maken. Wordt de afstand tussen de strookjes bimetaal door de warmte te groot, dan wordt de kring onder invloed van het kromtrekkende bimetaal onderbroken en koelt het bimetaal weer af.

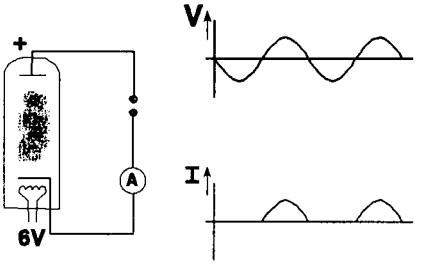
De spaarlamp

Een spaarlamp is een gaslamp met een bijzonder gasmengsel dat voor een aangenamere kleur zorgt. De start- en smoorspoelschakeling is gedeeltelijk elektronisch en is ingebouwd in de voet van de lamp, maar is

tegenwoordig ook separaat te verkrijgen. Een spaarlamp geeft bij een gelijk vermogen vijf maal zoveel licht als een gewone gloeilamp. Voor straatverlichting worden twee soorten lampen gebruikt: de hoge druk kwiklampen (TL) en de natriumlampen (oranjekleurig).

De gasbuisdiode

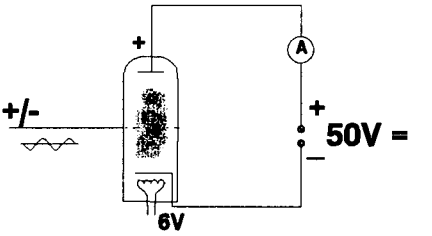
Het edisoneffect in een vacuümbuis maakt het mogelijk zo'n buis als gelijkrichter te gebruiken, omdat de drempelweerstand slechts bij één polariteit doorbroken kan worden, namelijk als de minpool op de gloeidraad aangesloten wordt.



in de kring heerst een wisselende gelijkstroom

de wisselspanning van de spanningsbron

De triodebuis

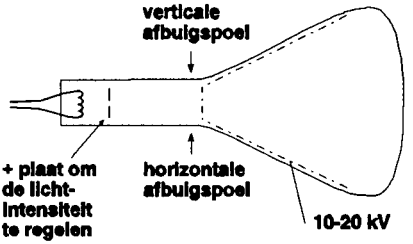


Tussen de anode en de door een gloeidraad verwarmde kathode van een triode zit een gaasvormig rooster, waarop een positieve of een negatieve spanning gezet kan worden. Dit rooster krijgt dan een positief respectievelijk negatief veld om zich heen, waardoor het vrije negatieve elektrische veld rond de kathode wordt aangetrokken of teruggedrongen. Dit fenomeen maakt het mogelijk de triode te gebruiken als versterker of schakelaar. De te versterken wisselspanning wordt zoals bekend op het rooster gezet. (Een aantal leermiddelenfirma's hebben grote demonstratiebuizen in hun leveringspakket, maar deze zijn heel gevoelig en hun levensduur is soms kort).

De televisiebuis

Een beeldbuis bestaat uit een hals waar de kathodestraling gevormd wordt, een beeldscherm en de conus, het deel dat een kegelvormige

verbinding maakt tussen hals en beeldscherm. De beeldbuis is een gloeidraad-vacuümbuis, waarbij het negatieve veld, de kathodestraling, versneld, gebundeld en gestuurd wordt en op de aan de binnenkant van het beeldscherm aangebrachte fluorescerende laag een lichtend puntje geeft. Dit puntje beschrijft 625 lijnen met een frequentie van 50 Hz. Eerst lichten de oneven lijnen op, daarna de even, zodat er 25 beelden per seconde getoond worden. Dit geeft ondanks de snelheid van de afwisseling een flikkerend beeld. De nieuwste en duurdere tv-toestellen werken met een frequentie van 100 Hz, waardoor het beeld stiller staat. Een kleuren-tv werkt meestal met drie gloeidraden en heeft een beeldscherm dat is opgebouwd uit 35.700 kleurentriplets, van in de primaire kleuren groen, rood en blauw oplichtende fluorescerende pigmenten. De kathodebundel moet om deze triplets goed af te tasten zeer exact worden scherp gesteld. Dit gebeurt door vlak voor het beeldscherm een gatenscherm te plaatsen met 35.700 gaatjes van 0,35 mm, zodat de fluorescerende poedervlekjes van 0,43 mm op het scherm in de juiste mate oplichten. De intensiteit waarmee elk beeldpuntje oplicht wordt geregeld met de wehneltcilinder; dit is een plaat met een negatieve spanning (0-100 V) die dicht bij de gloeidraad is opgesteld. Hoe groter deze spanning is, hoe zwakker de kathodebundel, die vervolgens met een zeer grote versnelspanning (10-20 kV) naar het beeldscherm gezogen wordt.



Er zitten nog meer regel-anodeplaten in een beeldbuis, onder andere om de spoelen en de bundel negatieve elektriciteit te synchroniseren en voor de beeldscherpte. De beeldbuis is echt een staaltje van techniek. Zo is op de fluorescerende poederpuntjes nog een laagje aluminium van 0,2 μm gedampt, die voor de geleiding van de negatieve elektriciteit zorgt en het fluorescerende licht ook nog naar voren spiegelt. De hals en conus van de buis zijn met een geleidend grafietlaagje bedekt, zodat de buis altijd veldvrij is. Het glas is loodhoudend om de röntgenstraling te minimaliseren.

Bij de oscilloscoop, die een sterke overeenkomst met de televisie vertoont, wordt de kathodebundel meestal elektrisch afgebogen. De tijdbasis wordt dan geregeld met een zaagtandspanning.

De röntgenbuis

Bij een hoog vacuüm en een hoge spanning kleurt, zoals we hebben gezien, het glas aan de binnenkant door toedoen van de kathodestraling

groen. Versterkt men dit effect door de kathodestraling op een metalen anode te laten komen, dan ontstaat een nieuw verschijnsel. Op het oppervlak waar de negatieve elektriciteit verdwijnt ontstaat namelijk een naar alle richtingen uitstralend veld, dat dwars door stoffen heen op het oneindige is georiënteerd. Dit veld kan nauwelijks gestuurd of gebundeld worden, maar door de naar voren uitstralende werking scherend langs een oppervlak te laten gaan kan de uitstraling iets gefocusseerd worden. De halveringsdikte van een stof (de dikte die de intensiteit van de röntgenstraling doet halveren) is kleiner naarmate de stof een hoger rangnummer in het periodiek systeem heeft.

Röntgenstraling wordt toegepast bij materiaalonderzoek (lasnaden, pijpaantasting en haarscheurtjes), controle van bagage, onderzoek van schilderijen, het menselijk lichaam (botbreuken, tanden, orgaanfoto's met behulp van contrastvloeistof), enzovoort. Er zijn tegenwoordig heel gevoelige fotomaterialen in de handel, waardoor de belichtingstijd kort en de intensiteit laag kan worden gehouden. Ook worden meestal beeldversterkers toegepast, waarbij het contrast wel vermindert, maar intensiteit en belichtingsduur veel geringer n beeldversterker is bijvoorbeeld gewoon een metalen plaat of een fluorescerend scherm. Door de röntgenstraling ontstaat in zulke stoffen namelijk weer vrije elektriciteit, die veel effectiever op een fotoplaat inwerkt, maar wel minder contrast geeft, echter nog wel voldoende om bijvoorbeeld een ruggewervelfoto te kunnen maken. Voor materiaalonderzoek naar kleine haarscheurtjes (enkele μm) wordt zonder beeldversterker gewerkt en wordt soms wel een belichtingstijd van een kwartier aangehouden, omdat de straling nauwelijks inwerkt op het fotografische materiaal.

De massaspectrometer

In de massaspectrometer wordt het effect aan de anode van een gasbuis, de anodestraling, gebruikt voor onderzoek van het gas dat in de buis zit. Anodestraling kan versneld en van richting veranderd worden door een elektrisch veld. Het kan ook van richting veranderd worden door een krachtige elektromagneet. Doet men alle elementen na elkaar in een gasbuis, dan blijkt anodestraling met dezelfde veldsnelheid in een magnetisch veld een grotere afbuigstraal te hebben naarmate het rangnummer van de stof in het periodiek systeem hoger is. Op deze wijze wist men aan het begin van de eeuw met zekerheid de volgorde van de elementen te rangschikken en niet alleen meer op basis van natuurkundige en scheikundige eigenschappen. De straal van de boog van koolstof is op 12 gesteld en alle andere waarden zijn hieraan gerelateerd. Een stof kan dus worden getypeerd door zijn stofnummer en zijn afbuigstraal. Bijvoorbeeld chloor, stofnummer 17 en straal 35,45. Bij nauwkeuriger onderzoek bleken zo

goed als alle stoffen meerdere cirkelbogen te hebben. Men spreekt hier van isotopen. Zo heeft chloor twee stralen: 35 en 37. De stralen van zulke bogen staan in een vaste verhouding tot elkaar.

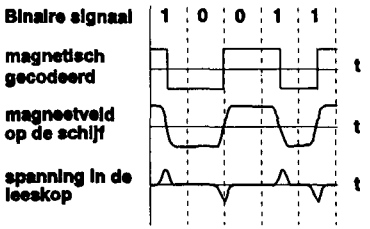
4.2 Digitale techniek

Diskettes

Op een diskette worden gegevens vastgelegd door middel van het richten van magnetisch materiaal. Alle soorten gegevens, zowel getallen, teksten, programma's, tekeningen als geluid, worden door de computer omgezet in een reeks nullen en enen (bits). Voor een regel tekst van ca 80 letters en spaties zijn ongeveer 600 bits nodig. Voor een figuur zoals hieronder afgedrukt is zijn ongeveer 381.000 bits nodig.

Op een computerdiskette zijn smalle cirkels aanwezig waarop de informatie staat. Er worden dan steeds stukjes van het diskettemateriaal in de looprichting van de diskette gemagnetiseerd of juist in de andere richting. Een "schrijfkop" loopt (vlak) over de diskette. Deze "schrijfkop" is een elektromagneet in de vorm van een hoefijzer, waarvan de polen erg dicht bij elkaar zitten. De "luchtspleet" tussen de polen is vaak slechts een paar μm, zodat het magneetveld niet erg uitgebreid is en de sporen erg smal kunnen worden.

De bits kunnen op vele manieren op de schijf als een reeks van magneetveldjes gecodeerd worden. Een van deze manieren (modified frequency modulation, MFM) gebruikt de zogenaamde klokpulsen van de computer. De richting van het magneetveld op de schijf verandert tussen twee klokpulsen als een '1' geschreven moet worden en het veld verandert niet tussen twee klokpulsen als er een '0' geschreven moet worden.

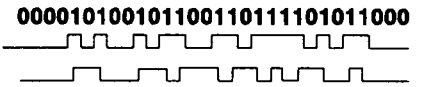


In de figuur staan onder het 0-1 patroon drie diagrammen. Het bovenste geeft aan hoe de stroomsterkte door de schrijfkop verandert bij de gegeven reeks van nullen en enen. Het tweede diagram geeft aan hoe de richting van het magneetveld op de diskette is. Het onderste diagram geeft de spanning in de leeskop weer. Deze is volgens de wet van Lenz maximaal als de verandering van het magneetveld op de diskette het sterkst is. Bij het lezen van het signaal moet de elektronica van de diskdrive deze spanning natuurlijk weer terugcoderen naar nullen en enen. Heel belangrijk is dan onder

andere dat de draaisnelheid van de diskette goed vast ligt en goed overeenkomt met de klokpulsen van de computer.

Compact disk

De wisselende spanning die door een microfoon opgewekt wordt en steeds evenredig is met de luchttrilling die gepaard gaat met het geluid, moet voordat deze weggeschreven kan worden op een compact disk omgezet worden in een digitaal signaal. Daartoe wordt de spanning elektronisch gemeten en omgezet in een getalwaarde. Dat noemt men bemonsteren. De spanning wordt 44100 keer per seconde vergeleken met maar liefst 16384 (= 2^{14}) niveaus. Elke 22,6 μs wordt dus de waarde van de spanning omgezet in een 14 bits binair getal. Om foutencontrole mogelijk te maken worden op slimme wijze aan dit getal nog eens 2 bits toegevoegd. Alle gemeten spanningswaarden worden omgezet in een reeks van putjes die in de cd-schijf geëtst worden. Dat zou kunnen op de manier zoals de bovenste lijn in de figuur hiernaast aangeeft, maar ook hier is het verstandiger om de putjes in de cdschijf zo te maken dat een 1 overeenkomt met een niveauverandering en een 0 weergegeven wordt doordat het niveau niet verandert (zie de onderste lijn in de figuur). De putjes worden geëtst in een lang spiraalvormig spoor op 1,6 μm van elkaar. Ter vergelijking zij even vermeld dat de afstand op een grammofoonplaat 100 μm is. De putjes zijn maar 0,5 μm breed en 0,1 μm diep. Ze worden afgetast door een 0,8 μm brede laserbundel die op ingenieuze wijze steeds op goede afstand van de plaat gehouden wordt en ook steeds goed boven het spoor. Het licht wordt in de putjes verstrooid en op het oppervlak waar geen putjes zijn scherp gereflecteerd. De gereflecteerde bundel wordt dan weer precies opgevangen op een lichtdiode.

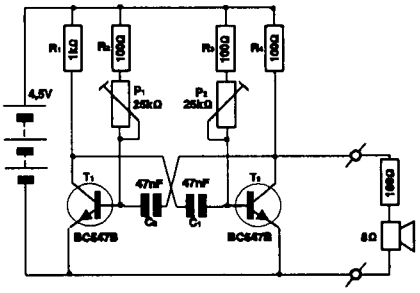


Op deze manier worden bij een omwentelingssnelheid van 500 toeren per minuut als de laser aan de binnenkant is en 200 toeren per minuut aan de buitenkant 4,3218 Mbits per seconde gelezen. Voor een tweekanaals 16 bits geluidssignaal is 1,4112 Mbits per seconde reeds genoeg. De geluidsinformatie wordt dan ook niet op de hierboven beschreven wijze gewoon achter elkaar op de disk gezet. Elk stukje informatie wordt eerst rekenkundig vermengd met de informatie ervoor en de informatie erna. Dat heeft tot gevolg dat het ontbreken of verkeerd uitlezen van informatie in de meeste gevallen geen kwaad kan omdat het ontbrekende signaal met behoud van voldoende kwaliteit uit het omgevende signaal berekend kan worden.

4.3 Halfgeleider techniek

Toongenerator

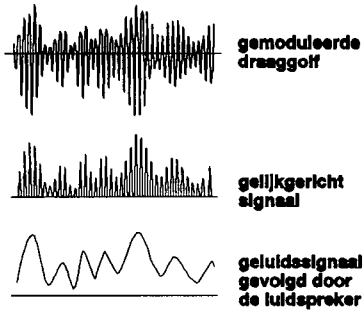
Een toongenerator is een elektrische schakeling die een wisselspanning maakt waarvan de frequentie en de amplitude aangepast kunnen worden. Als op de wisselende uitgangsspanning een luidspreker aangesloten wordt, kan je een geluid horen met een toonhoogte die overeenkomt met de ingestelde frequentie. Dit verklaart de naam.



Een eenvoudige schakeling om een toongenerator te maken is hiernaast afgebeeld. De condensatoren worden beurtelings opgeladen. Als de condensator C1 opgeladen is dan zorgt hij ervoor dat de transistor T2 kan gaan geleiden en dat condensator C2 zich kan opladen. Dit proces blijft zich afwisselen en dat resulteert in een wisselende spanning die op het luidsprekertje aangesloten kan worden. Door de waarden van P1 en P2 te veranderen kan men de frequentie van de wisselspanning instellen.

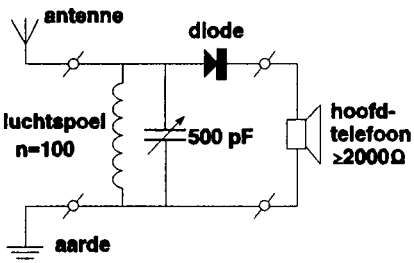
Kristalontvanger

De meest eenvoudige radio-ontvanger is de zogenaamde kristalontvanger. De naam hangt samen met het germaniumkristal in de diode. De ontvanger gebruikt geen batterij, maar heeft voldoende aan de energie uit de antenne. Met de instelbare condensator in combinatie met de spoel wordt een trillingskring gevormd, waarvan de frequentie ingesteld wordt door de capaciteit van de condensator te veranderen. De frequentie van deze trillingskring moet overeenkomen met de frequentie van de draaggolf van het signaal waarop het radiostation uitzendt.



De germaniumdiode (type AA112, AA113, AA119 of AA144) zal de gemoduleerde draaggolf gelijkrichten. De hoofdtelefoon kan door zijn traagheid alleen de amplitude volgen. De hoofdtelefoon kan niet een moderne laagohmige zijn, want dan zal de schakeling te veel belast worden. Het beste kan men een hoogohmige kristaloortelefoon nemen.

Desnoods kan men een telefoonluidspreker nemen met een voorschakelweerstand van enige honderden Ohms.

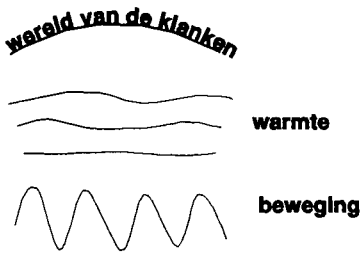


Als antenne kan je gewoon een lange draad (hoe langer hoe beter) buiten ophangen. De schakeling moet aan de waterleiding (niet aan de randaarde van het lichtnet) geaard worden. De spoel van 100 windingen kan je met gelakt wikkeldraad gewoon om een closetrol wikkelen, met aftakkingen na 30 en 80 windingen. Daar kan je later dan een beetje mee experimenteren. De aansluitdraden moeten kort en dik zijn.

4.4 Telecommunicatie

De wijze waarop naar een verschijnsel als telecommunicatie gekeken wordt hangt af van het mensbeeld dat men hanteert. Daarom willen we nog eens kort beschrijven waarop het mensbeeld dat ons voor ogen staat neerkomt.

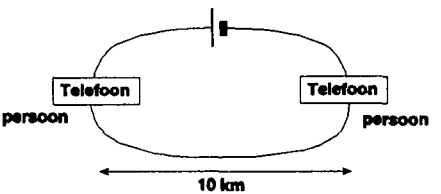
De mens is steeds een eenheid van lichaam, ziel en geest. Een lichaam zonder ziel en geest kan zich niet ontwikkelen en kan zelfs niet voortleven. In de slaap of in een toestand van coma zijn ziel en geest nog altijd in geringe mate met het lichaam verbonden. Het ziele/geestwezen van de mens heeft geregeld slaap nodig, het lichaam voor zich zou met minder rust kunnen volstaan. Alle gebeurtenissen van de dag moeten in de slaap verwerkt worden. Op deze wijze hangen lichaam, ziel en geest ten nauwste met elkaar samen.



Beschouwt men vanuit deze zienswijze de toon van een stemvork, dan wordt vanzelfsprekend niet alleen de trillende beweging van de stemvork, maar ook de toon of klank als een zelfstandig verschijnsel gezien. Toon en trilling hangen wel met elkaar samen, maar de één komt niet voort uit de ander. In deze zienswijze is het zeker niet zo dat er helemaal geen toon in de natuur bestaat. Toon is geen subjectief naar buiten geprojecteerde innerlijke beleving, maar het innerlijk van de uiterlijke natuur. Toon en

beweging vormen in die zin een eenheid, twee werelden gaan samen en het is weer de warmte die deze samenhang verzorgt.

Zijn twee mensen met elkaar in gesprek, dan zijn niet alleen hun onruimtelijke zielen actief, al sprekend is de ruimte ook doortrokken met klanken die de innerlijkheid van mens en natuur uitdrukken. Men ziet en hoort elkaar, meerdere zintuigen zijn actief en men bouwt relatief gemakkelijk een beeld van de ander op. Soms té gemakkelijk, dan komen we op vooroordelen terecht, waar we ons tegen kunnen wapenen door o.a. de aandacht te richten op nieuwe indrukken en het oordeel terug te houden. Hoe ziet deze situatie er uit wanneer twee mensen via de telefoon met elkaar in gesprek zijn op een afstand van 10 km?



De telefoon werkt zó alsof de ruimte ertussen niet bestaat. Men ziet elkaar niet, alleen het gehoor is actief. Het tijdsproces van spreken en luisteren is nauwelijks veranderd vergeleken met het gesprek in de huiskamer. Zou men naar de ander toe moeten gaan, dan beleeft men de uiterlijke afstand weer wel en vraagt dat ook beduidend meer tijd. Het aspect van de ruimtelijke afstand verdwijnt dus bij telecommunicatie. Het opbouwen van het beeld van de gesprekspartner kan bemoeilijkt worden doordat maar één zintuig actief is. Het verleden en ook de mate van innerlijke verbinding met de ander en de ervaring spelen een belangrijke rol bij het tot stand komen van contact.

De gehele elektromagnetische kring is in dezelfde fluctuerende toestand als de klinkende, bewegende lucht. De 2 × 10 km koperen verbindingsdraad is de uiterlijke verbinding. De magnetische en warmtevibraties creëren een tijds- en ruimteloze afspiegeling van de klinkende lucht. In plaats van de innerlijke, beleefbare klank zijn nu magnetische vibraties ontstaan in een elektrisch kringproces. Reeds eerder werd beschreven dat het elektrische kringproces de ruimte uiteenscheurt in een proces- en vormtendens, in de tegenstelling oneindigheid en punt. Terwijl het ruimteaspect dus door telecommunicatie wordt opgeheven, wordt er in plaats van de eenheid van de klanknatuur een uiteenscheurende polariteit werkzaam.

In de telecommunicatie speelt nog het volgende technische probleem. Men gebruikt de techniek van het 'multiplexen', dat is een techniek om zeer veel gesprekken tegelijkertijd door een verbinding te laten plaatsvinden, zonder dat deze elkaar storen.

In de eerste plaats begrenst men het frequentiegebied waarin een menselijk gesprek plaatsvindt tot het gebied van 300 tot 3400 Hz. Bij iedere volgende telefoonverbinding telt men 4000 Hz op. Alle signalen worden tegelijk op de draadverbinding gezet, zodat de gesprekken als het ware worden gestapeld zonder elkaar te storen. Bij een gewone kabel kan men maar 120 gesprekken (120×4 kHz = 480 kHz) stapelen. Want bij een laagfrequente wisselspanning wordt het elektrische verschijnsel aan de draad gebonden, maar bij hogere frequenties komt het los en gaat de draad als een antenne werken. Met een coaxkabel kan men 1000 tot 10.000 gesprekken (van 4 tot 60 MHz) stapelen.

Via een straalverbinding met een radardraaggolf (> 1000 MHz) kunnen 2700 gesprekken tegelijkertijd plaatsvinden. Paraboolantennes geven richting aan zo'n draaggolf. Deze staan circa 50 km uit elkaar en zijn zo'n 60 m hoog. De verbinding kan met een klein zendvermogen in stand gehouden worden. Het streven naar het oneindige van de radarstraling is door de paraboolvorm tot één richting beperkt. De draaggolf heeft van zichzelf uit de eigenschap om radiaal uit te breiden en wordt niet gestoord door aarde of atmosfeer.

Een volgende stap is het digitaliseren van gesprekken. Dat gebeurt door elk signaal per seconde een flink aantal keren te bemonsteren. De bemonsterfrequentie moet minstens 2 keer zo hoog zijn als de maximumfrequentie, 8000 keer per seconde is dus genoeg. Elke bemonsteringswaarde wordt vastgelegd met een 8 bits code, er zijn dus $2^8=256$ intensiteitsniveaus. Eén gesprek vraagt dus om 8000 × 8 = 64.000 bits/sec. In de meeste verbindingen, en zeker in de glasvezelverbinding, is een veel hogere snelheid mogelijk zodat in de tijd die voor het ene gesprek eigenlijk niet gebruikt wordt ruimte is voor het verzenden van de bits voor een ander gesprek. Gaat men dit weer multiplexen en omzetten in lichtvariaties, dan kan men met een glasvezel kabel van 0,009 mm dikte ongeveer 8000 gesprekken tegelijkertijd laten verlopen. Tegenwoordig zijn er glaskabels (monomodus) waar het licht geconcentreerd in het centrum blijft en waarmee men zonder versterker ruim 70 km kan overbruggen.

Zoals bij de gesloten kring de draad het elektrisch proces aan de aarde verankert, zo doet de glaskabel dat ten opzichte van het lichtproces. Licht wil zich nog sterker uitbreiden dan een elektrisch veld en laat zich alleen onder extreme omstandigheden binden aan de stof. De ragfijne glasvezel met een op het centrum georiënteerde structuur is hiertoe in staat. Het licht wordt daarmee in één richting gedwongen. Ook hier kan men de tegenstelling proces en vormfixatie onderscheiden:

	statisch	*dynamisch*	*zender*	*glasvezel*
proces:	elektrisch veld	elektrische tendens tot verdwijnen	amplitude of frequentievariaties	gefragmenteerd versplinterd licht
fixatie:	magnetisch veld	magnetische binding aan de draad	radardraaggolf met parabolische antenne	zeer dunne, gestructureerde glasvezel

Bij al deze communicatietechnieken is een polariserend proces werkzaam, terwijl de bedoeling van communicatie synthese is. In die zin staat het maken van contact en het realiseren van een verbinding haaks op de techniek die gebruikt wordt. Toch is dit een principe dat we in de wereld vaker ontmoeten: dat tegenstellingen samenwerken in min of meer labiele evenwichtssituaties. En zo mogen we concluderen dat de snelste, minst storingsgevoelige communicatieverbindingen, waar ruimte en tijd nauwelijks een rol spelen, gerealiseerd kunnen worden met sterk gepolariseerde fenomenen.

5. IDEEËNVORMING EN ACHTERGRONDEN VOOR DE DOCENT

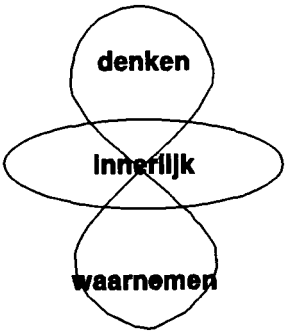
5.1 De natuurwetenschappelijke methode

In de elfde klas is het mogelijk om de natuurwetenschappelijke methode als zodanig te bespreken. Rondom de bespreking van het elektrische deeltjesmodel is het bijvoorbeeld van wezenlijk belang om ook de weg tot kennis te beschrijven die aan het opstellen van zo'n model ten grondslag heeft gelegen. Zonder dat deze thematiek tot hoofdmotief van de periode wordt verheven is het van belang de leerlingen tot bewustzijn te brengen, dat mensen niet alleen over religieuze of maatschappelijke vraagstukken heel verschillend kunnen denken, maar dat dit ook het geval is ten aanzien van natuurkundige fenomenen. In de elfde klas maken de leerlingen in de natuurkundeperiode voor het eerst kennis met resultaten van de reductionistische wetenschapsmethode, zoals het deeltjesmodel, terwijl zij in eerdere jaren geleerd hebben vanuit een fenomenologische invalshoek naar verschijnselen te kijken. Dit verschil in methodiek moet nu expliciet worden gemaakt, zodat zij om kunnen gaan met het hieruit voortvloeiende verschil in werkwijze en resultaat.

Eén mogelijkheid om de weg tot kennis te beschrijven is de volgende. De mens ziet zichzelf geplaatst tegenover de wereld. Sommige verschijnselen maken véél, andere weinig indruk op hem. Innerlijk is de mens immers zelf aanwezig met zijn voorstellingen, gevoelens en ervaringen. Wanneer de mens zich vanuit interesse met zijn zintuigen op de wereld richt, roept dit vragen op, waarop de antwoorden zich denkend laten vinden. Men kan nu met de leerlingen eigenschappen en typeringen vinden van het innerlijk, de waargenomen wereld en het denken. Er volgen nu een aantal omschrijvingen die langs deze weg kunnen ontstaan:

Denken
- is alleen door mijn eigen activiteit gegeven;
- is in mij, van mij en door mij;
- ik ben het zelf die denkt;
- we kunnen maar één ding tegelijk denken;
- de denkactiviteit is van mijzelf, maar de denkinhoud is objectief;
- denken geeft antwoorden;
- binnen het denken hangt alles samen;
- denken is verbanden leggen;
- er zijn verschillende denkactiviteiten: verstand, intuïtie, voorstelling, inspiratie en imaginatie.

Waargenomen wereld
- is zonder mijn activiteit gegeven;
- is buiten mij;
- het maakt (schijnbaar) voor het object niet uit of ik het waarneem;
- ik kan steeds onderscheiden of een waarneming hoort bij een object buiten mij of afkomstig is van een droombeeld of hallucinatie.



Innerlijk
- mijn interesse bepaalt heel veel;
- in mijn innerlijk verbind ik waarnemen en denken met elkaar;
- mijn ervaringen, voorstellingen en inzichten spelen een belangrijke rol bij nieuwe ervaringen;
- in mijn innerlijk komen de waarnemingen van de afzonderlijke zintuigen samen als één beeld in mijn voorstelling en herinnering;
- gedachten blijven als inzichten aanwezig.

Meestal hebben leerlingen nog een vanzelfsprekende, gezonde onderzoekshouding, die gevonden wordt in de geschetste verhouding tussen waarnemen en denken. In het denken, dat in het eigen innerlijk plaatsvindt, vindt men het wezen van het fenomeen. De waarnemingen op zichzelf zijn onsamenhangend. De illusie "meten is weten" zou niet gepropageerd moeten worden, zoals in schoolprojecten waar kinderen constant windsnelheid, temperatuur, hoeveelheid neerslag e.d. meten, waar deze gegevens op internet geplaatst worden, zonder deze metingen te bewerken. Er moet zeker gemeten worden, maar meten alléén is nog geen weten. Het is een vorm van waarnemen, die pas door een denkende verwerking tot weten wordt. In plaats van de leus "meten is weten" zou men kunnen stellen "het gebaar is waar!" Wat de mens na zorgvuldig waarnemen en denken vindt als karakteristiek, als wezenlijk aspect van het fenomeen, moet als waarheid worden gekenmerkt. Daarbij wordt denken niet gezien als "erover" denken, d.w.z. bestaande inzichten denkend over het verschijnsel heen leggen; maar denken is actief voorbereiden en wachten, ruimte geven aan de intuïtie, de vonk die moet inslaan.

Zoals het een illusie is om waarnemingen als kennis aan te duiden, zo is het ook een dwaling om een inzicht als *de* waarheid te betitelen. Alsof er een boven ons zwevende of zetelende objectieve waarheid zou bestaan. De polen waarnemen en denken leiden alleen in integratie tot beleefbare waarheid, maar kunnen elkaar ook te weinig bevruchten, zodat de tegenstelling tussen feitenkennis en geloofswaarheid ontstaat. Weten-

schap en geloof worden dan de onverenigbare oevers waar het ik in zijn bootje tussen dobbert. Sommige kerken vergeten de natuur, zoals veel wetenschappers de moraliteit uit het oog verliezen bij het zoeken naar inzicht in het wereldgebeuren. De tegenstelling waarnemen-denken wordt teruggevonden in de tegenstelling tussen natuurkundig en wiskundig denken. Het natuurkundig- of natuurdenken vindt zijn aangrijpingspunt in het waarnemen en het inlevingsvermogen van de mens, het wiskundig denken speelt zich volledig af in het menselijk bewustzijn. Alleen zijn deze twee niet tegenover elkaar blijven staan, zoals bij geloof en wetenschap, maar heeft het wiskundige denken het natuurdenken verdrongen. Daarmee heeft de natuurkundige kennisweg zich sterk in een eenzijdige richting ontwikkeld. Waarnemen is verworden tot meten, en denken is geïdealiseerd tot wiskundige analyse en bewerking. Deze ontwikkeling is al bij Copernicus en Descartes begonnen en zet zich tot nu toe voort. Op deze bodem kon het modeldenken en het materialisme zich ontwikkelen. Vandaar dat Steiner de fenomenologie als een "Erweiterung" zag ten opzichte van de gangbare methoden.

Een andere mogelijkheid om de weg tot inzicht te bespreken is het naast elkaar plaatsen van de natuurkundige en de wiskundige benadering, elk met zijn specifieke kenmerken. Het uitgangspunt is voor beide hetzelfde: verwondering en interesse voor het verschijnsel dat men bestudeert. Vervolgens richt men zich op de specifieke aspecten.

De wiskundige weg	*De natuurkundige weg*
De waarnemingsinhouden, zoals punt, lijn, driehoek, e.d. moet ik zelf creëren.	De wereld is als waarnemingsinhoud buiten mij om gegeven.
Met de waarnemingen zijn ook de voorstellingen gegeven, omdat wiskundige elementen voorstellingen zijn.	Waarneming en inleving zijn duidelijk te onderscheiden van de voorstelling, die met het geheugen samenhangt. Heeft men de waarneming sterk in zich opgenomen, dan is men tevens in staat er een eigen voorstellingsbeeld van te maken. (Oefening: Kijk naar wat voor je op tafel ligt. Sluit je ogen en tracht je voor te stellen wat er ligt en hoe het er ligt. Door steeds te kijken en voor te stellen ontstaat een exacte voorstelling.)

Nu volgt er een duidelijk beleefbare drempel. Men kan zeggen: ik heb het verschijnsel gezien, herinner mij het ook, maar ik begrijp het niet. In deze fase vullen de twee methoden elkaar op evenwichtige wijze aan:

Door middel van het denken wordt de samenhang gezocht tussen de voorgestelde elementen.

Door middel van het denken worden waarnemingsfragmenten van de natuur in een inzichtelijke samenhang gebracht.

Wanneer het begrip van die ene bijzondere situatie is ontstaan, duiken weer nieuwe vragen op: de totale samenhang, de hele kosmos, wil men in zijn samenhang doorgronden. Men wil door middel van het denken de idee vinden waardoor alles bepaald is. Deze nieuwe stap, het zoeken naar grote samenhang, werpt een gigantische drempel op, waarbij de twee methoden verschillende wegen gaan: de wiskundige methode tracht de samenhang te realiseren door middel van een wiskundig geformuleerd *model*, de natuurkundige methode zoekt integratie van de verschijnselen in een *"oeridee"* dat aan alles ten grondslag ligt.

In de laatste eeuwen is de wiskundige methode gaan overheersen en de natuurkundige methode achtergebleven. Bovendien is het denken in wiskundige modellen gepaard gegaan met het vermaterialiseren van de ideeën tot waarnemingsinhouden. Zo werd bijvoorbeeld de polaire structuur van de ruimte, punt tegenover oneindigheid, vermaterialiseerd tot de zware atoomkern en de ijle elektronenconfiguratie. Tweede voorbeeld: een veld als interactieruimte wordt gekwantificeerd voorgesteld door ontelbare interactiedeeltjes, die zorgen voor het contact. Een gedachteninhoud kan binnen het materialistische denken geen interactie beschrijven: stoten en gestoten worden, het wiskundige punt-contact-denken, voert de boventoon. Een model vraagt om bevestiging. Vandaar de tendens tot selectief waarnemen in plaats van de integratie van waarnemen en denken tot inzicht in de natuur als totaliteit.

De wiskunde is volledig los komen te staan van de natuur en lijkt alleen voor zichzelf betekenis te hebben. De grieken zagen het getal nog als de goddelijke openbaring van de schepping. De huidige rekenkunde, waarin we bijvoorbeeld pythagoreïsche drietallen zoals 3, 4 en 5 hanteren, zegt niets meer over de wereld.

De fenomenologische natuurkundige methode is grotendeels verdrongen door de eenzijdige wiskundige methode van na 1500 n.C. Het vinden van overkoepelende ideeën heeft altijd al een hoge drempel, maar wordt in sterke mate bemoeilijkt door de wiskundige methode en het daarmee samenhangende modeldenken.

Het is van het grootste belang om leerlingen die van nature neigen tot de wiskundige kennismethode te laten kennismaken met de fenomenologische methode, omdat deze methode streeft naar een diepgaander, meer verinnerlijkte en spirituelere verbinding met de natuur dan vanuit het modeldenken mogelijk is. Vanzelfsprekend zal ook het modeldenken met zorg en diepgang besproken moeten worden, temeer daar dit in voorgaande jaren niet is gebeurd. Maar het modeldenken mag niet het uitgangspunt en verklaringsprincipe vormen binnen deze periode. Een mogelijkheid is om eerst één à twee weken fenomenologische natuurkunde te behandelen en daarna het modeldenken als thematisch onderwerp te brengen.

5.2 Het atoommodel

Een mogelijke vorm waarin het atoommodel besproken kan worden is de volgende. In het begin van de periode stelt men de vraag "wat is elektriciteit?" en laat die vraag voorlopig staan. Vervolgens gaat men aan het werk, tast het gebied door onderzoek van vele elektrische en magnetische fenomenen grondig af en laat zodoende de leerlingen tot het inzicht komen, dat "wat iets is" niet in één woord, zin of voorstelling uitgedrukt kan worden, maar een verbonden zijn inhoudt met iets wezenlijks, dat zich in alle fenomenen uit. Het is het onzichtbare in het zichtbare.

Als bewustzijnshulp zou men de vraag "wat is?" kunnen stellen aan de hand van iets bekends, bijvoorbeeld warmte. De leerlingen kunnen die vraag op verschillende manieren proberen te beantwoorden:

1. Men noemt een *fenomeen* (door wrijving ontstaat warmte, door expansie ontstaat afkoeling, door warmte voel je je lekker).
2. Men noemt een *begrip* (warmte en koude zijn meetbaar aan temperatuur).
3. Men noemt een *innerlijke beleving* (warmte in de natuur is liefde in het innerlijk, ze zijn verwant).
4. Men noemt een *vergelijking* (warmte is net als een geur, hij opent ons voor de ruimte).

De vraag "wat is warmte?" kan echter niet beantwoord worden en toch is iedereen verbonden met warmte en kent iedereen de warmte. Een verinnerlijkt kennen komt wel tegemoet aan de vraag "wat is?", dit vervolgens uitspreken brengt echter altijd maar één facet naar voren: een waarneming, een begrip, een innerlijke beleving of een vergelijking. Wanneer men vanuit deze vier invalshoeken aan de slag gaat, dan zijn onbegrepen fenomenen interessanter, omdat leerlingen en leraar dan doordrongen zijn van het besef dat de grote vraag naar "wat is?" slechts zoekend benaderd kan worden. Wanneer de periode in dit licht gestaan

heeft en men behandelt op het eind ervan het atoommodel door alle behandelde fenomenen begripsmatig onder te brengen in deze microscopische kosmos, dan zal niemand het gevoel hebben dat de vraag "wat is elektriciteit?" beantwoord moet worden met het begrip "elektronen". Dit gevaar is anders toch aanwezig. Vele wetenschappers, docenten en schrijvers spreken namelijk uit dat de oergrond van elektriciteit het elektron is. Het wezen, de oergrond van iets is echter nooit als een waarneming te vatten. Ook als we het elektron als realiteit nemen en we hieraan een voorstelling verbinden, behoort het tot de waarnemingswereld. Eerst het waarnemen en het denken sámen laat een wezensontmoeting in de menselijke ziel tot stand komen. Alleen een integratie van beide geeft een reële verbinding tussen de mens en de natuur, terwijl door het modeldenken de mens zich eerder isoleert in zijn voorstellingen.

De verschillende fenomenen kunnen als volgt ondergebracht worden in het modelbeeld:

fenomeen	*model*
1. Elektriciteit ontstaat als +/- tegenstelling. Min-eleketriciteit is vrij, plus-elektriciteit traag en stofgebonden.	Dit wordt gevat in het beeld van kern en elektronenwolk.
2. Isolatoren en geleiders.	Voorgesteld door gebonden en vrije elektronen.
3. Rond een gloeidraad is een negatief veld.	Voorgesteld als het uitstoten van losgevibreerde elektronen.
4. De volgorde van stoffen gerangschikt naar eigenschappen volgens het periodiek systeem.	In samenhang gebracht met de hoeveelheid elektronen in verschillende schillen.
5. De massaspectrometerproeven.	De kernmassa, isotopen.
6. Röntgenstralingfenomenen.	In samenhang gebracht met de binnenste elektronen.
7. Het verschijnsel radioactiviteit.	In samenhang gebracht met de kern (massadefect en kernmutaties) en de schillen.

5.3 Begripsverruiming

In deze paragraaf zullen een aantal begrippen belicht worden met de bedoeling tot een exacte, maar ruimere inhoud ervan te komen. Aan de orde komen de begrippen ruimte, tijd, duur en dood.

De ruimte

De ruimte wordt sinds de 15e eeuw steeds meer opgevat als een lege, structuurloze, euclidische ruimte, waar voorwerpen in zijn en processen in plaatsvinden. De ruimte zelf doet in deze opvatting niet mee met aardse en kosmische veranderingen. Dit is een statische opvatting van ruimte. Hier wordt gepleit voor een dynamische ruimteopvatting, aansluitend bij de projectieve meetkunde, waarin de ruimte gestructureerd wordt door punten, lijnen en vlakken in een polaire dynamiek (zie deel I, paragraaf 4.9.5). De extremen daarin zijn het oneindig geconcentreerde punt en het alzijdig gesloten oneindig verre vlak.

In de natuur vertonen extreme fenomenen ook altijd *beide* ruimtelijke extremen. Zo vertegenwoordigt de sterrenwereld het oneindig verre vlak, maar is het tegelijkertijd een puntenveld, en is het enkele kristal beeld voor een punt, maar heeft het tegelijkertijd een vlakkenomhulling. De grootste tegenstelling tot de sterrenwereld wordt gevormd door de geheel vaste maan, die veel gruis bevat, maar waar de kristallijne steenstructuren bolvormige insluitsels bevatten. De bol kan daarbij gezien worden als een uit oneindig veel vlakken bestaande vorm.

Fenomenen tonen de polaire structuur van de ruimte en de structurerende krachten die er in werken. Laat men bijvoorbeeld een blokje tin smelten, dan hebben de kristalliserende, structurerende krachten geen vat meer op de stof. Daarbij zou men vanuit de geschetste visie de kristaltendensen niet *ín* de stof moeten voorstellen, maar als *werkend op* de stof. Het zijn deze intensief en intrinsiek aanwezige tendensen, die men als de ruimte kan beschouwen. Een andere polariteit die behoort tot de ruimtelijke processen is levitatie tegenover gravitatie. (Zie deel I, paragraaf 4.1.1.)

In het dynamische ruimtebegrip dat we hier willen formuleren ontstaat ruimte of ontstaan ruimtelijke aspecten met het in verschijning treden van toestanden of processen. Zo geeft het ontstaan van een elektrisch veld een andere kwaliteit aan de ruimte, net zoals de sfeer in een ruimte bepaald wordt door de erin aanwezige mensen. De ruimte kan men beschouwen als de totaliteit van processen die in het verleden gebeurd zijn, in het heden gebeuren en in de toekomst gaan gebeuren.

De tijd

De tijd wordt meestal eenzijdig beschouwd als een lineair proces dat van verleden naar toekomst verloopt. Dit causale stuwende tijdsbegrip is eigenlijk alleen geldig voor mechanisch verlopende processen. Naast de *stuwende* tijd, waar het ene het andere in beweging zet, is er ook de *finale* tijd. Een plant groeit naar zijn volledigheid toe. De vormen die ontstaan zijn in de biochemische structuur niet te vinden, maar de vormen ontvouwen zich volgens een finaal gericht ontwikkelingsproces, waar de omgeving van licht, lucht, vocht en aarde modificerend op inwerkt. Naast de genoemde stuwende en finale tijd kan men nog de *cyclische* tijd onderscheiden. Op aarde zijn veel dingen of processen niet eenmalig, maar treedt een cyclische herhaling op. De steeds weer in bloei komende lindeboom laat dit op zíjn specifieke manier zien.

Duur

Het blijvende, dus wat duur- of eeuwigheidskarakter heeft, verschijnt naast die fenomenen die zich in veranderingen uitdrukken. Een mens bijvoorbeeld doet van alles, bevindt zich op vele plaatsen, de stof in zijn lichaam wisselt voortdurend, zijn denkbeelden wijzigen zich, hij heeft tal van gevoelens, maar toch is er iets dat duur heeft en niet in deze verandering opgaat. Natuurprocessen die zich herhalen, maar toch hetzelfde blijven, vertonen ook duurkarakter. In de *verschijningswereld* als zodanig is niets blijvend. Het blijvende moet als *innerlijke hechtheid* getypeerd worden.

De dood

De dood ontstaat uit het leven en niet andersom, zoals veelal wordt beweerd. Het leven kan dat wat dood is weer in zich opnemen. Dit geldt vooral voor de plantenwereld die in hoofdzaak groeien door de opname van licht, lucht en mineralenhuishouding. De hogere dieren en de mens kunnen slechts in geringe mate het minerale, met zijn sterk afgezonderde karakter, in zich opnemen, maar wel licht, lucht en water.

Dood is afzondering uit de totaliteit, uit de samenhang. Wanneer eiwitten onderzocht worden moet men hen eerst uit het leven halen, waar ze in oplossing werkzaam zijn. Men kan ze slechts onderzoeken nadat ze eerst zijn samengeklonterd en verstard. In de natuurkundige natuur kan men fenomenen ook het beste onderzoeken door ze eerst te isoleren. Men hanteert dan de gedachte, dat alles wat men aan het geïsoleerde fenomeen waarneemt ook in het oorspronkelijke verschijnsel heeft gezeten, volgens de logica: wat ergens uitkomt moet er vooraf ingezeten hebben. Maar men vergeet dat sommige waargenomen aspecten tijdens het isoleren ontstaan kunnen zijn. Hier laat zich de vraag naar ontstaan en vergaan bij

aansluiten. In de wetenschap heerst op dit punt een eenzijdige opvatting: men veronderstelt dat alle waar te nemen aspecten al in de ruimte aanwezig zijn, bijvoorbeeld als basisbouwstenen van alle stoffelijkheid. Iets nieuws kan volgens deze visie nooit ontstaan, alleen nieuwe combinaties.

Net zoals bij een levend organisme de vorm ervan niet uit de biochemie valt af te leiden, zo zijn in de natuur- en scheikunde de stofeigenschappen niet af te leiden uit röntgenstructuurfoto's en zeker niet uit atoommodellen. Wel kan men natuurlijk de eigenschappen het model "inrekenen". Wanneer men zonder vooropgezette ideeën en kennisdwang naar de wereld kijkt, dan zijn ontstaan en vergaan, leven en dood, duur en verandering, klaarblijkelijk aanwezige toestanden of processen. Ook in het gebied van de elektriciteit is het ontstaan en vergaan toch heel pregnant aanwezig. Steeds weer moeten de juiste voorwaarden gecreëerd worden om het te laten ontstaan. Tevoren is het in een potentiële, latente, niet-ruimtelijke staat. Treedt het eenmaal in verschijning, dan tendeert elektriciteit steeds weer naar deze potentiële staat. Het streeft ernaar in proces te zijn en daarbij uit de ruimte te ontglippen.

Op de geschetste wijze zouden tal van begrippen verruimd kunnen worden, opdat de idee de mens niet teveel bindt. Steeds weer moet een kennisproces doorlopen worden om vrij te kunnen zijn ten opzichte van de inzichten die zich in het denken manifesteren.

5.4 Natuur en geest

Op existentiële vragen als "wie ben ik?" en "wat is de aarde en de kosmos?" zijn velerlei antwoorden mogelijk, antwoorden die echter van doorslaggevend belang zijn voor de manier waarop de mens zijn eigen leven inricht, naar andere mensen kijkt en hoe hij omgaat met de natuur. Of men de mens als een biochemisch apparaat of als een levend organisme of als bezield of als ziele-geestwezen ziet, heeft invloed op ieder facet van het mensenbestaan. Voor de gedachte dat de mens meer is dan stof alleen ontstaat in onze tijd weer meer ruimte. Maar hoe is dat gesteld met de natuur? Moet de natuur ook gezien worden als een uitdrukking of openbaring van scheppende geest, of is de natuur alleen maar chemisch-natuurkundig? Door zelfkennis leert de mens de eigen geestelijke kern beleven, maar hoe leert men het geestelijke aspect van de natuur kennen? Wij willen hier de opvatting naar voren brengen dat men via inlevende kennis toegang tot het geestelijke in de natuur kan krijgen. Vanaf het moment waarop men het eigen innerlijk als een reële zelfstandige activiteit beleeft, is de mogelijkheid gegeven te onderkennen dat

zelfkennis en natuurkennis van dezelfde oorsprong en kwaliteit zijn. De mensheidsontwikkeling in de 20e eeuw heeft tot steeds toenemende zelfkennis geleid. Het onderscheiden van geledingen en activiteiten binnen de ziel is gemeengoed geworden. Steeds meer mensen zijn ook in staat hun schaduwzijde of dubbelganger te onderscheiden, zodat deze steeds minder in het duister van de ziel verborgen blijft, maar bewust aangepakt kan worden.

Is er bij de natuur ook zo'n schaduwzijde werkzaam? Een "schaduwnatuur" die zich liever verstopt in het onzichtbare, maar die zich synchroon aan de mensheidsontwikkeling steeds meer gaat manifesteren? Wij menen dat dit zo is en dat deze schaduwnatuur gevonden wordt in de elektromagnetische verschijnselen, alsmede de röntgen- en radioactieve straling. Zoals men innerlijk om zou moeten gaan met de eigen dubbelganger, zo vormt de omgang met deze schaduwnatuur een morele uitdaging voor de mensheid. De polariserende werking van elektriciteit en magnetisme zijn verwant aan de dubbelgangeraspecten, die ook tenderen naar extremen. Zowel in de schaduwnatuur als in de dubbelganger van de mens is het ene extreem het steeds in proces willen zijn, eindigend in het niets, het andere extreem het streven naar absolute, en dus verstarde en geketende vorm.

Het vinden van overeenkomsten tussen de mens en natuurverschijnselen is een belangrijke activiteit voor de leerkracht zelf. Hij leert dan langzaam aan zo te spreken dat de relaties tussen mens en wereld, tussen micro- en macrokosmos vanuit de natuurbeschrijving oplichten.

5.5 De dynamiek van de gesloten kring in relatie tot de ruimte en de mens

Zoals in paragraaf 5.3 is aangeduid kan aan de ruimte een polaire structuur worden toegekend, waarvoor de projectieve meetkunde de basis geeft. Alle ruimtelijke voorwerpen zijn ingebed in deze structuur. Ze zijn in de eerste plaats aanhechtingsmogelijkheid en in de tweede plaats middelpunt van deze polaire structuur.

Samenhangend hiermee geven ruimtelijke processen twee tendensen te zien: een streven naar omvattende eenheid, alzijdigheid en oneindigheid, respectievelijk een streven naar verdichting, differentiatie, contour en isolement. Zo is bijvoorbeeld bij het proces van kristalliseren de verdichtende tendens actiever dan de oplossende, verijlende.

De kosmische ruimte zou onder invloed van deze polaire tendensen in extremen uiteengaan, als er geen krachten waren die zich hiertegen verzetten. Zulke krachten komen tot uiting in warmte/koudeprocessen, die

geen extremen toelaten of deze tenminste tegenwerken. Warmte/koudeprocessen vereffenen alle differentiaties en voeren alles naar een samenhangende eenheid.

Nu is het bijzondere van de fenomenen van de gesloten kring (zie paragraaf 3.3), dat de extremen tevoorschijn komen. De tendensen werken niet meer volledig in elkaar, maar komen naast elkaar te staan. De eenheid van alle ruimtelijke verschijnselen wordt als het ware in zijn polaire uitersten tot fenomeen in het gevormde magneetveld en het dynamisch proces van de elektriciteit. De warmte probeert dit uit elkaar scheuren tegen te gaan en krijgt des te meer greep op dit proces naarmate de kring warmer is. Wordt de kring te koud en kan het proces zichzelf niet meer opwarmen, dan ontstaat de absolute en ook blijvende tegenstelling tussen de verdwijnende elektrische tendens en de verstarde magnetische vorm (supergeleiding). Wordt omgekeerd een magneet tot boven zijn Curietemperatuur verhit, dan kan het magnetisme niet meer werkzaam zijn en moet het de stof verlaten. Dit laatste is met de volgende proef te demonstreren:

Hang een dun nikkelen plaatje aan een koperdraad en verwarm het tot roodheet. Bij circa 800°C zal het plaatje niet meer aangetrokken worden door de magneet.

Magnetisme en warmte kunnen dus naar twee kanten elkaar uitsluiten:

1. Bij hoge temperatuur kan het magnetisme geen greep meer krijgen op de stof, de autonomie is te klein om tot ontplooiing te kunnen komen.
2. Is de stof te koud, dan is het isolement zo groot dat de warmte geen tegenproces meer kan leveren en treedt het verschijnsel van supergeleiding op.

Tussen deze boven- en ondergrens zorgt warmte voor het evenwicht tussen de polariserende tendensen van het naar vorm strevende magnetisme en de in proces verdwijnende elektriciteit.

De elektrische en magnetische processen in natuur en techniek zijn een beeld voor bepaalde innerlijke processen, namelijk voor al die processen die samenhangen met vervluchtigen en/of verstarren in één bepaalde richting. Elektromagnetische processen brengen in de natuur tweespalt teweeg: de vormtendens van het magnetisme en de procestendens van de elektriciteit vullen elkaar niet aan, maar sluiten elkaar uit. De ruimtestructuur, die intrinsiek polair is, wordt door elektromagnetische processen uiterlijk polair. De samenhangende, elkaar doordringende polariteit van punt en oneindigheid wordt als het ware uiteengescheurd, zoals de mens een hartverscheurende tweestrijd in zijn ziel kan beleven.

Bij de ontwikkeling van de mens zien we vanuit een oorspronkelijke samenhang een geleidelijke verzelfstandiging van de drie zielekrachten denken, voelen en willen. De persoonlijkheid, zich als ik aansprekend, houdt orde en samenhang in deze differentiatie. Echter, vele extreme, veelal partiële psychische eenzijdigheden kunnen zich voordoen, zoals neuroses, psychoses, schizofrenie, workaholic, dwepen, gevoelsarm denken, gedachteloos doen, ontoerekeningsvatbaar zijn, enzovoorts. De moderne mens loopt het gevaar dat partiële zielestructuren op zichzelf gaan functioneren en dat de daaruit voortkomende eenzijdigheden in het maatschappelijke leven of in het intermenselijke verkeer ontoelaatbare vormen aan kunnen nemen. Zoals de warmte de polariserende tendensen in de gesloten kring in evenwicht houdt, maar dat wel binnen bepaalde grenzen, zo houdt het menselijke ik de uiteenstrevende zieleneigingen bijeen; ook daar echter zijn grenzen in acht te nemen, wil de samenhang bewaard kunnen blijven.

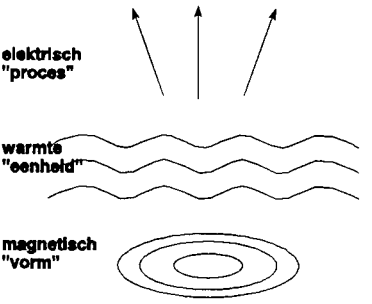
Een wetenschap zonder verbinding met de mens dreigt te ontaarden in een illusie. Daarom wordt hier nagestreefd die verbinding bewust te leggen door de oneindig gedifferentieerde zieleroerselen, die ons zo van nabij gegeven zijn, bij het kenproces te betrekken. De ziel wordt daardoor de openbaarder van de natuur en de natuur wordt uiterlijk zichtbaar gemaakte zieleprocessen. Op grond hiervan wordt de uitspraak begrijpelijk: "Wilt u de wereld leren kennen, kijk in uzelf. Wilt u uzelf leren kennen, kijk in de wereld."

5.6 Toestand contra stroming

In het voortgezet onderwijs is het algemeen gebruikelijk om de gesloten elektrische kring met een stromingssituatie te vergelijken. Het stromende, gesloten watercircuit, met pomp en regelventielen, lijkt een geschikte analogon.

Hier willen we zoeken naar een rationele natuurbeschrijving die recht doet aan de fenomenen zelf. Het valt dan op dat er in een gesloten elektrische kring niets stroomt. Wanneer de kring gesloten wordt, treedt er in de gehele kring, inclusief de accu, een magnetische en warmteactiviteit op. Tevens vindt een spanningsval plaats, afhankelijk van de draadlengte, dikte en materiaal. De warmte verdwijnt door convectie en straling, het magnetische veld ligt cilindervormig rond de draad en in de accu vindt stofverandering plaats en concentratieveranderingen aan de plus- en minpolen. De gesloten kring verkeert in een dynamische toestand, die zich heel snel instelt en even snel weer oplost als de kring verbroken wordt.

De dynamiek van het magnetisme is, zoals we in paragraaf 3.1 hebben gezien, vormvast, traag, compact, gesloten en wordt getypeerd door de tendens zich te verdichten tot een punt. De warmteprocessen verlopen altijd zo dat er vereffening optreedt. De warmte heeft de tendens de totale ruimte tot een eenheid te maken, dat wil zeggen hij streeft naar ongedifferentieerdheid, naar een totaliteit waarin alle verschillen zijn vereffend. Het elektrische aspect is bij de gesloten kring het meest verborgen. De spanning bij de open kring drukt uit dat er potentieel iets kan gaan gebeuren, maar verder is er niets van warmte, magnetisme of elektriciteit waar te nemen. Het is als bij het klaarzetten van de ingredienten voor het bakken van een taart. Pas als de kring gesloten wordt ontstaat er iets nieuws.



De drie tendensen, warmte, magnetisme en elektriciteit, blijven in samenhang met elkaar en roepen elkaar ook wederzijds op. De *uit de ruimte* strevende, zuigende elektrische tendens en de *tot een punt* verdichtende magnetische tendens staan in groot contrast tot elkaar, de tegenstelling die zij vormen scheurt de ruimte als het ware open. De warmte streeft juist naar eenheid en werkt als tegenproces op de tegenstelling van de elektrische en magnetische tendensen in, die ieder in een verschillende richting de ruimte uit streven. De beschreven dynamiek ontstaat niet door ruimtelijke stroming van enige entiteit, maar doet zich voor als een dynamische toestand van velden, die in samenhang staan met de ruimtelijke polariteit van het oneindige en het puntachtige.

De dynamiek die hier beschreven wordt blijkt achteraf meer verwantschap met het atoommodel te hebben dan van tevoren misschien was te verwachten. Wanneer de starre kern en de beweeglijke, van de stof onafhankelijke elektronen als tendensen in plaats van ruimtelijke deeltjes gezien worden, dan blijkt een grote overeenkomst met de bovenstaande beschrijving. Op de geschetste wijze gezien gaan de fenomenen echter een actieve en samenhangende taal spreken. De tegenstelling elektriciteit en magnetisme kan ook in samenhang worden gezien met de zenuwen resp. hersenen en het bewustzijn van de mens. De elektrische en magnetische fenomenen scheuren enerzijds de natuurlijke ruimtelijke samenhang uit elkaar, maar openen deze ook. De hersen- en zenuwcellen verkeren in een bijna doodstoestand, dat wil zeggen dat de stof op het punt staat uit de levende samenhang te vallen. En juist deze cellen met hun elektrische/magnetische activiteit vormen het lichamelijke instrument voor het

waarnemen en het denken, dus voor bewustzijnsprocessen. Hier opent de mens zich voor het onruimtelijke. Men kan de vergelijking nog verder doortrekken. Zoals de stofwisselingsprocessen in de accu voorwaarden zijn voor de velddynamiek van warmte, elektriciteit en magnetisme, zo is de stofwisseling in de hersenen voorwaarde voor het menselijke bewustzijn. Het in stand houden van een toestand vraagt energie. Zowel bij de gesloten kring als bij de mens zal de energiebalans kloppen, niet omdat uit het ene het andere voortkomt, maar omdat het ene voorwaardenscheppend is voor het andere.

Als de docent zich dergelijke gedachten eigen maakt, dan is hij in staat de leerlingen iets van de grote samenhangen te laten zien die bestaan tussen mens en kosmos. Elektrische en magnetische processen staan niet op zichzelf maar staan in samenhang met de gehele ruimtelijke en onruimtelijke wereld. Meestal wordt onderschat wat de gevolgen zijn van het huidige gesloten systeem en modeldenken voor de ontwikkeling van leerlingen. Het zou een interessante en belangwekkende studie opleveren om na te gaan hoe natuurwetenschappelijke ideeën een stempel hebben gedrukt op de politieke, economische en religieuze ontwikkeling van de mens.

5.7 Bijzonderheden over het magnetisme

In samenhang met paragraaf 3.2 volgt hier een uitbreiding van de magnetische fenomenen.

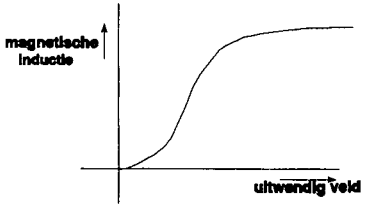
Ferromagnetische eigenschappen ontstaan tijdens een afkoelingsproces. Op de kristalvlakken ontstaan labyrint-achtige patronen, in de vorm van paden en hagen, die in en om elkaar heen slingeren. De paden hebben de NZ- en de hagen de ZN-oriëntatie. Dit patroon wordt in gepolariseerd licht als spiegeleffect microscopisch zichtbaar. De patronen worden de gebieden van Weiss genoemd en zijn slechts enkele μm groot. De franse natuurkundige Pierre Weiss opperde in 1930, vóórdat deze patronen voor het eerst gezien werden, dat er in een ferromagnetische stof kleine magneetjes zitten die door een uitwendig magneetveld gericht worden. Het blijken geen geïsoleerde magneetgebiedjes te zijn, maar de labyrintachtige slingerpatronen.

Onder invloed van een uitwendig magneetveld verschuift het patroon: de hagen worden dunner en de paden breder. Is de stof maxi- maal gemagnetiseerd, dan is er geen patroon meer zichtbaar. Neemt het uitwendig veld vervolgens weer af, dan treedt het patroon bij harde ferromagnetische stoffen weer gedeeltelijk in verschijning, maar dit blijkt heel sterk afhankelijk te zijn van de spanningen in de kristalstructuur. Om

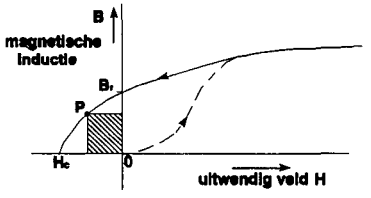
deze reden worden bijvoorbeeld alnico-magneten, bestaande uit een legering van aluminium, nikkel en kobalt, 1 à 2 uur uitgegloeid bij 600 °C. Het hele afkoeling- en uitgloeiproces vindt plaats in een uitwendig magneetveld om de kristalstructuur en de magnetische oriëntatie zo gunstig mogelijk te maken. De structuur van de alnico-magneten is dan vezelachtig.

Naast deze gegoten en gegloeide magneten worden de meeste magneten vervaardigd door metaalpoeders te sinteren (persen bij hoge temperatuur). Daartoe worden de poeders in een metaalmolen heel fijn en rond gewreven, omdat uit onderzoek is gebleken dat poederdeeltjes van enkele μm geen labyrintpatroon vertonen, maar verzadigd magnetisch zijn. Vervolgens richt men de poeders in een uitwendig magnetisch veld en sintert men dit tot een blijvende vorm. Deze magneten hebben een veel grotere mechanische sterkte dan de gegoten magneten en men kan er een remanentie (d.w.z. de magnetische kracht na het wegvallen van het uitwendig veld) mee bereiken van 80% van dat van de gegoten magneten. Hiermee wordt duidelijk dat de kristalstructuur een wezenlijke bijdrage levert aan de magnetiseerbaarheid. Om nader te bepalen welke rol de kristalstructuur speelt bij het ontstaan van het magnetisme bespreken we een aantal *B-H* curven (*B* is de magnetische inductie tengevolge van het uitwendige veld *H*).

Een materiaal dat uitwendig niet magnetisch is wordt in een veld gebracht waardoor een veldverdichting plaatsvindt en het materiaal zelf magnetisch wordt. Met een magneto-meter, waarin de zelfinductie van een spoel bepalend is voor de meetwaarde, wordt het magneetveld ter plaatse gemeten. Het normale verloop hiervan kan als volgt in grafiek gebracht worden: eerst verzet de stof zich tegen magnetisatie, gaat er daarna maximaal in mee en vervolgens treedt een grenswaarde op. Deze wordt bepaald door de verzadigingswaarde van de magnetisatie van de stof, dat wil zeggen dat het patroon van Weiss geheel verdwenen is.



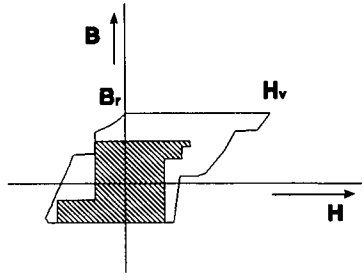
Wordt nu het uitwendig veld verminderd en vervolgens omgepoold, dan neemt de magnetisatie niet volgens dezelfde kromme af, maar wil zich handhaven. Wanneer de uitwendige magnetische veldsterkte nul is blijft er nog een remanente magnetisatie B_r over. Om deze te laten verdwijnen is een tegenveld nodig, de zogenaamde



coërcitieve veldsterkte H_c. Het werkpunt P van de magneet ligt daar waar de energiedichtheid die de magneet kan leveren maximaal is. Dit is het geval bij maximale oppervlakte van de rechthoek $B \times H$ in dit gedeelte van de kromme.

Bij een wisselend uitwendig veld H krijgt de B-H curve een puntsymmetrische vorm, de zogenoemde hystereselus. Het demagnetiseren van een magneet gebeurt door deze in een wisselend uitwendig veld te brengen met afnemende amplitude.

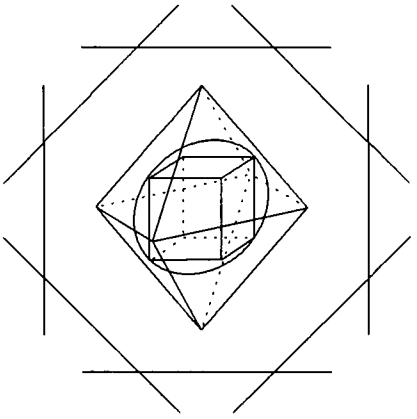
De magnetische inductie B wordt gemeten door een geleidende draad, die deel uitmaakt van een elektrische kring, in het magnetische veld te brengen en de kracht te meten die deze draad ondervindt. De eenheid Tesla (T) is gelijk aan N/Am. Het tegenveld H_c wordt gemeten door de inductie te meten van een spoel in het veld. De eenheid is A/m. Het werkpunt BH_{max} heeft als eenheid T·A/m = (N/Am)·(A/m) = Nm/m^3 = J/m^3. Zie voor B- en H-waarden van diverse magnetische materialen de betreffende tabel.



Bepaalt men voor materialen bestaande uit poederdeeltjes de hystereselus door meting aan één deeltje, dan is de grafiek afhankelijk van de hoekigheid en de regelmaat van de kristalstructuur van het poederdeeltje: de buitenste lus wordt bij hoekig, dat wil zeggen niet uitgegloeid, de binnenste bij uitgegloeid, dus minder hoekig poedermateriaal gemeten. In het verzadigingspunt H_v is er geen labyrintpatroon. Bij het hoekige poeder ontstaan stapsgewijs patroonveranderingen. Een sterk tegenveld is nodig om het patroon verder te vervormen en tenslotte omgekeerd verzadigd te krijgen. De neiging tot patroonvorming en tot het vastzetten van dit patroon is groter dan bij het ronde uitgegloeide poedermateriaal. Het veld klapt haast abrupt om bij een bepaald tegenveld. Het kristalpatroon van hoekige, niet uitgegloeide poederdeeltjes is willekeurig en tevens is het magnetisme gevoeliger voor stoten en temperatuurverandering. Het hoge remanente magnetisme B_r van de hoekige poederdeeltjes is niet stabiel en zal in de tijd snel afnemen, terwijl dat van de uitgegloeide poederdeeltjes minder hoog, maar vrij constant is. Dit sprongsgewijs veranderen van het veld wordt aan hele magneten ook in lichte mate waargenomen (barkhauseneffect). De verandering van het patroon van Weiss van de afzonderlijke kristalletjes verloopt wel sprongsgewijs, maar ieder sprongetje levert procentueel slechts een kleine bijdrage.

	stoffen	$B_{verzadiging}$ (T)	H_c (A/m)	T_{Curie} (°C)
zacht	kobalt	1,8	950	1400
	nikkel	0,6	400	630
	ijzer	2,2	80	1040
	permalloy Fe:Ni:Mn= 19:78:3	1,1	4	
	ferroxcube MnO:Fe2O3= 48: 52	0,36		500
	ijzer+3%Si	1,95	24	
		$B_{remanent}$ (T)	H_c (kA/m)	BH_{max} (kJ/m^3)
hard	koolstof-staal	0,9	4	
	remalloy Fe:Mo:Co= 71:17:12	1,0	20	
	alnico	1,1	48	35
	barium-ferriet: keramisch	0,4	160	29
	zeldzame aarden:			
	samarium-kobalt	0,9	900	170
	neodynium -ijzer -boron	1,1	1000	240

Dit verschil tussen hoekige en ronde poederdeeltjes wijst er wellicht op dat het magneetveld een sterker aangrijpingspunt heeft in de hoeken van een kristal, zoals dit ook het geval is bij de warmte. In deel I (paragraaf 4.9.5) werd uiteengezet dat de warmte in de hoeken van een kristal het meeste aangrijpt, waardoor de kristalpunten het eerste zullen smelten. Vanuit de projectieve meetkunde kon dit in verband worden gebracht met het gegeven dat de warmte als omhullende (in de vorm van een octaëder) als eerste het uitzettende kristal als kern (in de vorm van een kubus) aan de hoekpunten doordringt.



Magnetisme ontstaat, zoals we hebben gezien, spontaan tijdens het afkoelingsproces. Nu blijkt de kristalstructuur van haast alle legeringen en verbindingen de kubische vorm te moeten hebben wil magnetisatie mogelijk zijn. Zo zijn er legeringen die pas bij lage temperatuur (ca 200°C) en door gloeien kubische kristallen vormen, terwijl ook dan pas het magnetische weisspatroon ontstaat. In een kubisch kristal worden drie assen onderscheiden: de ribbe, de vlaksdiagonaal en de lichaams-diagonaal. In de richting van een ribbe blijkt een kristal gemakkelijker te magnetiseren. Vergeleken met het magnetiseren in de richting van de vlaks- of lichaamsdiagonaal is ongeveer een honderdste van het veld nodig. De verzadigingswaarde is voor de drie assen natuurlijk wel gelijk. Zo'n stof wordt anisotroop genoemd.

Door de voorgaande waarnemingen en feiten met andere verschijnselen in relatie te brengen lichten er ideële relaties op. Het para- of diamagnetisme is een stofeigenschap die onafhankelijk is van de agregatietoestand, terwijl het ferromagnetisme alleen in de vaste stof fase voorkomt. Het ferromagnetisme is een fenomeen dat net als bijvoorbeeld het kristalliseren ontstaat bij afkoeling van een stof. Kristaleigenschappen zijn in de vloeibare fase niet te vinden, zij ontstaan als iets volledig nieuws beneden het smeltpunt. Zo ontstaat het magnetische weisspatroon op de kristalvlakken beneden de curietemperatuur. Naast afkoeling zijn heel specifieke kristal-vormprincipes voorwaarden waaronder ferromagnetisme spontaan kan ontstaan.

Bij de vorming van een kristal verdicht en isoleert zich de stof en emancipeert zich daarbij van de warmtesfeer. Op dezelfde manier horen

verdichting, isolatie en emancipatie ook bij het ferromagnetisme. Het veld tendeert steeds naar een versplintering in een weisspatroon, maar laat tevens een behoudende tendens zien: de hystereselus laat steeds een achterlopen op het uitwendige veld zien, een tendens tot fixatie, tot niet meegaan met de verandering. Het evenwicht tussen beide aspecten, versplintering en behoudende tendens, is het remanent magnetisme.

De vloeistoffase laat in zijn druppelvorm de verwantschap met de gehele aarde zien. Het kristal kan daarbij als een aarde op zichzelf worden gezien, met een eigen oriëntatiepunt. Een magnetisch kristal is in het verzadigingspunt nog meer verwant aan de aarde, omdat het nu ook een eigen magneetveld heeft. De warmte is de grote tegenspeler van het magnetisme: boven de curietemperatuur laat de warmte de magnetische verdichtingssfeer niet werkzaam worden.

warmte

magnetisme

- patroonfixatie en versplintering aan kristalhoeken en onregelmatigheden
- beeld van de aarde met twee vaste polen

IJzer, nikkel en kobalt uit groep 8 van het periodiek systeem hebben niet alleen ten aanzien van het magnetisme een bijzondere positie, maar ook ten aanzien van de kunstmatige radioactieve processen, alsmede de hoge soortelijke warmte per volume-eenheid, welke die van water evenaart. Legt men de reeks van zeldzame aarde (57 t/m 71) op de tussenreeks (21 t/m 35) dan vallen samarium en ijzer precies samen, evenals nikkel en gadolinium. Beide paren zijn ferromagnetisch. (Kobalt heeft geen ferromagnetische tegenhanger, evenals de ferromagnetische zeldzame aarde elementen cerium en terbium):

21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35
Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br
57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu

Misschien is de reeks van de zeldzame aarden op te vatten als een herhaling van de voorgaande reeks. Zij zijn echter allemaal giftig, terwijl dat bij de metalen niet altijd het geval is.

Het para- en diamagnetisme bevestigt de chemische activiteit van de elementen. De chemisch actieve tot agressieve elementen, alsmede de

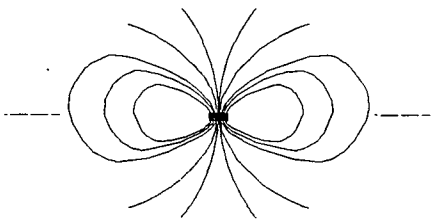
onafhankelijke edelgassen zijn allen diamagnetisch. Zij laten zich niet in een veld zuigen, maar neigen naar veldverdunning en beweeglijkheid. Daartegenover staan de passieve en onedele stoffen (waar ook een stof als natrium onder gerekend wordt, die zich immers laat aanvreten), die alle paramagnetisch zijn. Zij laten zich in de veldverdichting en fixatie trekken. Dat wil zeggen dat zij op passieve wijze de magnetische verdichting ondergaan, net zoals zij chemische oxidatie ondergaan.

diamagnetisme - streven naar veldverdunning en beweeglijk blijven
↕
paramagnetisme - passief ondergaan van verdichting en verstarring

Het *ferromagnetisme* is heel ver geëmancipeerd van de kosmische eenheid. Het is een beeld van een versplinterende punttendens, die zich al verdichtend in een patroon vastzet.

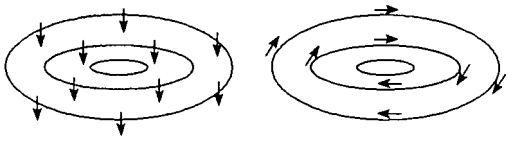
Bij magnetisme gaat het niet zozeer om de polen, die niet zoals bij elektriciteit een eigen kwaliteit vertegenwoordigen, maar om het veld. Het aantrekken of afstoten van de polen is wel direct waarneembaar, maar niet het oerfenomeen. De verdichtende, verstarrende tendens van het veld is het primair waarnemend-denkende gegeven waar het hier om gaat. Het veld wil zich verstoppen in de stof. Ook bij meerdere magneten, of bij een combinatie van één magneet en bijvoorbeeld een aantal spijkers, treedt altijd veldverdichting in een steeds kleinere ruimte op. Het typische van het veld blijft de polaire structuur. Wanneer men een spijker in een magneetveld brengt zal deze altijd in de richting van het veld gaan staan en zelf gemagnetiseerd worden. Het veld dwingt hier de stoffelijke drager in een bepaalde richting. Vervolgens wordt de spijker gemagnetiseerd in de lengterichting.

Het in zich gesloten magnetische veld heeft zijn eigen tendens en vorm. Het tendeert naar de torusvorm, waarbij de drager naar het centrum gedwongen wordt. Een kleine staafmagneet toont dit torusvormige veld. De kleinste magneet zou de ruimtelijke torus met een minimale inwendige lengte benaderen.



Doorsnijdt men het veld loodrecht, dan ontstaat een concentrische ringenstructuur. Zo'n magneetveld, dat spontaan ontstaat onder invloed van afkoeling, zullen we een statisch veld noemen, omdat het blijvend is. Het magneetveld rond een elektrische kring kunnen we een dynamisch

veld noemen, omdat het onderhevig is aan het momentane kringproces. Het statische veld lijkt op het dynamische, met dien verstande dat in het statische veld de veldlijnen loodrecht op de ringen staan, terwijl zij in het dynamische veld langs de ringen liggen. De verschillen en de verwantschap tussen het statische en het dynamische magnetisme zal verder fenomenologisch onderzocht moeten worden.



5.8 Fenomeen, veld en sfeer

De mens verhoudt zich zó tot de wereld dat hij aan de waarneming van de verschijnselen niet direct het begrip kan aflezen. Dit begrip, of anders gezegd de samenhang met de overige natuur, blijft in de waarneming verborgen. Door het denken kan deze samenhang als een onzichtbare dimensie in het zichtbare oplichten: een onzichtbaar weefsel van relaties tussen de verschillende fenomenen kunnen wij ontdekken door deze te "be-schouwen", innerlijk te bezien. Er is geen dwingende reden om de waarnemingswereld wél als reëel en existentieel te beschouwen en de denkwereld of de wereld van relaties alleen als een product van de mens. Zoals wij betrekkingen aangaan met de uiterlijke wereld, zo verbinden wij ons met de relatie-wereld door er met ons denken in te "lezen". Wanneer een fenomeen tot verschijning wordt gebracht, zoals bij het wrijven van twee platen, dan vindt er dus niet alleen iets plaats met uiterlijke dingen, maar wordt ook de wereld van relaties en samenhangen actief.

Plato noemde deze wereld van relaties de ideeënwereld. Hij zag deze als scheppend, creatief en actief en de uiterlijke fenomenen als het gevolg van deze scheppende activiteit. Aristoteles sprak over de wereld van de "potenties". Wrijvingselektriciteit is potentieel aanwezig en als twee platen gewreven worden dan wordt deze potentie actueel. In dit boek worden de woorden fenomeen en sfeer gebruikt om het tastbare, zichtbare verschijnsel respectievelijk de onruimtelijke, ongeworden, potentiële toestand aan te duiden.

Bij wrijven ontstaat elektriciteit als ruimtetoestand. De ruimte rond het voorwerp krijgt een bijzondere structuur en hoedanigheid. Deze gestructureerde ruimte behoort weliswaar tot de wereld van de fenomenen, maar is toch niet direct waarneembaar. Het typeren van deze toestand is alleen mogelijk door waarnemen én denken, beide activiteiten zijn

volledig verweven. Met Michaël Faraday spreken we in de natuurkunde in zo'n geval van "veld". Een veld is het ruimtelijk worden van relaties tussen dingen. Sfeer en fenomeen gaan hier op een heel subtiele wijze samen, terwijl zij vaak gescheiden worden gezien, bijvoorbeeld de gewreven plaat als fenomeen en elektrische modelstructuur als oorzaak.

Fenomeen, veld en sfeer kunnen voor de naar kennis strevende mens een drie-eenheid gaan vormen. Een vergelijking, waarbij gebaar, tendens en proces verwant zijn, kan dit nog verduidelijken. Wanneer de mens slaapt is zijn bewustzijn niet werkzaam door het lichaam. Er is dan een relatieve scheiding tussen het lichaam en het zielewezen van de mens. Wanneer de mens ontwaakt werken lichaam en zielewezen samen. Dan hebben we een situatie die vergelijkbaar is met een veld, waar fenomeen en sfeer samenwerken.

5.9 Eenheid en verval

Wanneer men de ruimtelijke, geworden wereld als een samenspel van polariteiten, krachten en tendensen ziet, dan is het de vraag welke plaats de elektriciteit hierin heeft. Om hierop in te kunnen gaan zullen we eerst de verschillende aggregatietoestanden typeren.

De gastoestand laat in de uitzettingswaarden een ongedifferentieerde samenhang zien tussen alle gassen. Gassen vormen met elkaar ook een volledig vermengde stoffelijke eenheid, in tegenstelling tot de vaste stof, waar alles naast elkaar staat en waar een veelheid van kristallen is, die allemaal iets van het grondpatroon afwijken.

De polariteit eenheid-veelheid, die in gas en vaste stof tot uitdrukking komt, vertegenwoordigt een tegenstelling die algemeen in de wereld werkzaam is. Een andere wetmatigheid is die van proces en tegenproces. Laat men een onderkoelde vloeistof kristalliseren, wat een overgang naar verdichting en veelheid inhoudt, dat ontstaat warmte als tegenproces. Kijkt men vanuit deze blikrichting naar het wrijvingsproces, dan kan men wrijven zien als het in elkaar wrijven van twee materialen, een tendens tot eenheid is werkzaam. Als tegenproces ontstaat nu elektriciteit, die remmend op de wrijvingsbeweging werkt en tevens, als de stoffen ruimtelijk gescheiden worden, de tegenstelling van + en - pool laat ontstaan. Tegenover het eenwordingsproces van de wrijving ontstaat het dualistische proces van de elektriciteit.

In elke ontwikkeling of evolutie gaat de ongedifferentieerde eenheid aan de veelheid vooraf. Het terugvoeren tot de eenheid blijkt tot gevolg te hebben dat een dualiteit ontstaat. Dit zou men als een tegenproces in de tijd kunnen beschouwen, zoals het voorbeeld van de kristallisa-

tiewarmte een ruimtelijk tegenproces vertegenwoordigt. Wil men als het ware "terug in de tijd", terug naar eenheid en samenhang, dan ontstaat als tegenproces een dualistisch verschijnsel dat remmend en tegenwerkend ingrijpt.

Bij de geestelijke ontwikkeling van de mens ziet men een dergelijk soort proces. Neigt men ernaar teveel in zich zelf te verijdelen, dan treedt in de ziel van de mens de dubbelganger versterkt naar voren. Dit is een extreem dualistisch aspect van de ziel dat tot uitdrukking komt in moraliteitsloze gedachten respectievelijk slimme egocentrische handelingen. Wanneer de geestelijke ontwikkeling van de mens niet evenwichtig verloopt, dan valt de verborgen dubbelganger uit de samenhang van de ziel en verzelfstandigt. Het wrijvingsproces waardoor warmte en elektriciteit ontstaan heeft hetzelfde proceskarakter als de geschetste eenzijdige ontwikkeling van de mens. De uiterlijke warmte bij het wrijven en de innerlijke warmte van de zielestrijd typeert de samenhang, die de tegenstellingen niet verder uit elkaar wil laten drijven. De zelfstandig geworden dubbelganger bemoeilijkt de voortgaande geestelijke ontwikkeling en isoleert de mens. Parallel daaraan kan men de vraag stellen: typeert het ontstaan van elektriciteit in de natuur het verval en de neiging tot isolatie in de natuur?

5.10 Elektromagnetisme en de mens

De tegenstelling tussen het elektrische en magnetische veld kan, zoals we in paragraaf 3.1 hebben gezien, worden aangeduid met de begrippen proces en vorm.

uiterlijk	*innerlijk*	*gesloten kring*
magnetische gestiek	elektrische gestiek	spanning V $Q=V\cdot C$ (condensator)
elektrische gestiek	magnetische gestiek	stroom(magn) I $Q=I\cdot t$ (spoel, kring)

Kijkt men naar het menselijke lichaam, dan vindt men deze tegenstelling terug in de polariteit van de steeds in beweging en proces zijnde stofwisseling en het in rust verkerende zenuwstelsel. Beschouwen we het innerlijk van de mens, dan ligt de zaak minder eenduidig. De innerlijke activiteit die met het hoofd samenhangt, het denken, en het handelingsleven, dat met stofwisseling en ledematen samenhangt vertonen beide zowel een proces als een vormtendens. Toch is in het denken het procesmatige overheersend, terwijl het gestructureerde handelen meer de vormkant vertegenwoordigt.

De gesloten kring, die bepaald wordt door spanning, stroom en het product van beide, toont nog duidelijker de dynamische activiteit die ook bij de mens plaats vindt. Gedachten, herinneringen die komen en gaan, tenzij men ze weet te fixeren, staan tegenover de door ervaring gestructureerde handelingen, zoals lopen en schrijven. In het "midden" van het innerlijk vindt een integratie van deze twee extremen plaats, daar beleeft de mens zijn eigen wezen, daar spreekt hij zich zelf aan als "ik".

Ook de tegenstelling condensator↔spoel gaat meer tot de verbeelding spreken en krijgt daardoor meer diepgang wanneer deze in relatie tot de menselijke zielegestalte wordt gebracht. De directheid waarmee de condensator meedoet met de elektrische processen, die snelle afwisselingen volgt en in proces en verandering blijft, is bijvoorbeeld ook typisch voor het hoofdproces.

De stroom/het magnetisme is bij de gesloten kring een dynamisch begrip. Berekend men echter de hoeveelheid elektriciteit door met de tijd te vermenigvuldigen, dan wordt dit dynamische tijdsproces een abstracte grootheid. Gebruikelijk is deze grootheid ruimtelijk voor te stellen, men spreekt dan van lading. Omdat het een abstracte grootheid betreft, overziet men moeilijker dat de fenomenen deze veronderstelling niet dwingend voorschrijven. Daarmee is de dynamische stroom geworden tot een abstract begrip, omdat hij wordt ingekleurd met het begrip lading. Stroom heeft als begrip een belangrijke betekenis gekregen, maar het proceskarakter is er uit verdwenen.

Dit geldt in nog sterkere mate voor het begrip arbeid. Ook daar is door de vermenigvuldiging met de tijd de dynamiek uit het begrip verdwenen. Arbeid en lading zijn belangrijke kengetallen voor het elektrische proces, maar het gevaar is aanwezig dat ze tot de essentie van het proces verheven worden, waardoor de eigenlijke dynamiek niet meer gevat wordt.

5.11 Aarde, kosmos en mens

In deze paragraaf worden een aantal elektrische en magnetische verschijnselen rond aarde, kosmos en mens met elkaar in samenhang gebracht. Overweegt men iets hiervan in de les te behandelen, dan is het van belang dat dat aansluit bij de inzichten die de docent eerder met de leerlingen ontwikkeld heeft. Anders zou het loze kennis opleveren. Belangrijk voor een pedagogisch proces is dat niet alleen een veelheid van feiten gebracht worden, maar dat hier ook een integratieproces op volgt die deze veelheid weer in een synthese brengt, waardoor de leerling een antwoord krijgt op de vaak onbewust gestelde vraag naar samenhang tussen mens en wereld.

We onderscheiden vier soorten elektriciteit en magnetisme:

1. hoogfrequente wisselspanning in een gesloten of open kring (zender);
2. statisch elektrisch veld en vrij elektrisch veld(Edison);
3. een elektrische kring met gelijkspanning (geeft vooral magnetisme);
4. statisch magnetisch veld.

De zon heeft een gigantisch groot maar zeer zwak magneetveld. De elektrische activiteit springt veel meer naar voren: de door het hele planeetstelsel uitstromende "zonnewind" is elektrisch van aard, vrije elektriciteit; elektrische waterstof en helium vormen de hoofdbestanddelen. Deze zonnewind trekt grote spiraalarmen door het planetenstelsel. De zon is ook een zender, net als sterren en de totale kosmos (zogenaamde achtergrondstraling).

Van de sterren is deze zenderactiviteit het meest in het oog springend. Typerend voor een zenderveld is zijn gerichtheid op het oneindige en onruimtelijke. Het is een oplossend veld. In de aarde zijn aardstromen aanwezig die als potentialen in de grond te meten zijn. Tevens heeft de aarde, net als enige andere planeten, een groot en langgerekt druppelvormig magneetveld. Dit veld verandert voortdurend van vorm, als een soort ademhaling; de as ervan valt niet samen met de aardas. Aan het aardoppervlak is het heel onregelmatig van vorm en gesteenteonderzoek heeft uitgewezen dat de polariteit al vele malen is omgeklapt gedurende de aarde-evolutie. De aarde heeft een relatief klein atmosferisch elektrisch veld, dat samenhangt met de honderden bliksems die per seconde op aarde plaatsvinden. Verder zijn er op grote hoogte nog enige elektrische lagen (ozonlaag en ionosfeer). Ten slotte is de aarde ook een zwakke zender, men spreekt van aardstraling. Uit deze fenomenen spreekt de volgende indeling:

sterren: - vooral zenderactiviteit
zon: - vooral elektrische activiteit
aarde - vooral magnetische activiteit

De drie fenomenen zijn bij alle drie hemellichamen te vinden, maar steeds overheerst er één. Vanuit dit gezichtspunt kan de vraag ontstaan: is de aarde ook nog een beetje ster en zon?

Het magneetveld van de aarde existeert in samenhang met de aarde maar is op te vatten als een entiteit voor zich. Zoals een gevoel of een gedachte *aan* het menselijk lichaam ontstaat, zo zou ook het aard-magneetveld *aan* de aarde ontstaan. Het aard-magneetveld is mogelijk op te vatten als een organisme, waarvan wij de betekenis nog nauwelijks doorgronden. Bij de beschrijving van de veranderlijkheid van het aard-magneetveld en van het omklappen van de polariteit drong zich al de vergelijking met de ademhaling op.

De aardpotentialen en -stromen kunnen als inductieverschijnselen van de roterende aarde in zijn druppelvormige magneetveld worden opgevat, daar de aardas niet samenvalt met de ook enigszins geknikte magnetische as. Deze beschouwing leidt tot de gedachte dat het aard-magneetveld remmend op de rotatie inwerkt. Het aard-magneetveld heeft ook een beschermende werking ten opzichte van het leven, daar het de aarde afschermt voor de elektrische zonnewind en de kosmische straling.

De magneetvelden van de planeten Mercurius, Jupiter, Saturnus, Neptunus, Uranus en Pluto hebben zeer uiteenlopende vormen. Zo heeft het magneetveld van Jupiter dubbele polen en een lemniscaatachtige vorm. Bij Uranus en Neptunus maken de magneet- en de planeet-as een hoek van 50°.

In het volgende overzicht worden alle beschreven fenomenen samengebracht:

sterren:	zendereffect	oplossend veld, naar oneindige en onruimtelijkheid strevende tendens
zon:	vrije negatieve en stofgebonden positieve elektriciteit	ruimtefenomeen in ijle kosmos, verwant aan de gasbuisfenomenen
aarde:	magneetveld en aard-stromen	omhult de ruimtelijke aarde, beschermt het aardse leven, sluit de aarde af van de kosmos

Zoekt men de genoemde elektromagnetische fenomenen op bij de mens, dan ontstaat in het kort de volgende indeling:

- De organen hebben een zenderuitstraling, vooral de nieren, thymus en epifyse. Het betreft radarstraling met een golflengte van 5-15 cm. Deze uitstraling verandert sterkt door bijvoorbeeld aardstraling.
- De huid heeft oppervlaktespanningen van enkele tienden Volt en is verdeeld in een patroon van positieve en negatieve velden. Bij ziekte verandert dit patroon. De huidweerstand neemt af in situaties van verrassing (toepassing leugendetector). Men spreekt van de psychogalvanische reflex. De spieren reageren op spanningsveranderingen, evenals de zenuwen. Een enkele cel is inwendig negatief ten opzichte van een positieve omgeving. De cel geeft dus hetzelfde elektrische beeld zal de aarde, die negatief is ten opzichte van de positieve atmosfeer.
- De hersenen hebben een goed meetbare magnetische activiteit (EEG, wordt gemeten in potentialen). Ook het hart geeft een magnetische puls.

Uitgaande van deze elektromagnetische fenomenen kijken we naar de relatie tussen kosmos en mens:

organen en sterren:	zender
de huid en de zon:	elektriciteit, potentialen
hersenen, zenuwen en de aarde:	magnetisme en stromen

Plaatst men de toepassing van elektromagnetische fenomenen hiernaast, dan geeft dat weer een aanvullende karakteristiek:

elektriciteit: (weinig magnetisme)	rekenapparaat, computer, digitale informatieverwerking bij cd
magnetisme:	kracht (elektromotor, dynamo) en fixeren van informatie (magneetband, schijf)

Dat de hersenactiviteit in samenhang staat met het behoudende, naar vorm strevende magnetisme hangt mogelijk daarmee samen, dat door de hersenactiviteit de voorstellings- of denkinhoud gefixeerd wordt en tot bewustzijn komt. Het magnetisme dat samengaat met de hersenactiviteit is dan geen uitdrukking van het denken, maar brengt de *innerlijke* denkactiviteit tot bewustzijn, zodat het gefixeerd wordt en men niet meer in proces is. Veel hersenactiviteit zou dan dus betekenen dat er veel denkprocessen vertraagd, geremd en in zichzelf gesloten raken.

INHOUDSOPGAVE 12e KLAS

1. Inleiding 233
   1.1 Natuurkunde in de 12e klas 233
   1.2 Opbouw van de periode 235
   1.3 Zelfstandig werken 239
   1.4 Het oproepen van vragen 241

2. Lichtleer 245
   2.1 Kijken en het oog 245
   2.2 Schaduwen en beeldvorming 249
   2.3 Kijken in spiegels 252
      2.3.1 Afstand zien 252
      2.3.2 Tasten en zien 254
      2.3.3 De vlakke spiegel 254
      2.3.4 Niet-vlakke spiegels 258
      2.3.5 Perspectief zien in een (niet-vlakke) spiegel 260
      2.3.6 De spiegelwet 263
      2.3.7 Practicum spiegels 265
   2.4 Het zien in of door doorzichtige media 272
      2.4.1 Beeldheffing en beeldstuwing 272
      2.4.2 Beeldverschuiving, breking 276
      2.4.3 Beeldvergroting/verkleining 278
   2.5 Randfenomenen 282
      2.5.1 Aanzet tot fenomenologische benadering 282
      2.5.2 Practicum kleurgetal 290
   2.6 Kleurfenomenen in dunne laagjes 293
   2.7 Polarisatie 295
   2.8 Spectroscopie 298
   2.9 Lichtintensiteit 301
   2.10 Lichtsnelheid 302

3. Kleurenleer 305
   3.1 Inleiding 305
   3.2 Hemelkleuren 305
      3.2.1 Het begin van Goethe's kleuronderzoek 305
      3.2.2 Troebele media 306
      3.2.3 De op- of ondergaande zon 307
      3.2.4 De blauwe hemel 309
   3.3 Prismatische kleur 310
      3.3.1 Het ontstaan van prismatische kleur in samenhang met breking 310
      3.3.2 Optische dichtheid en duisterniswerking 313

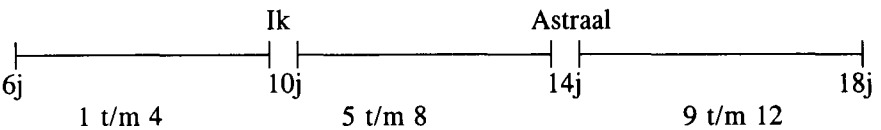
3.3.3 De dynamiek van de kleurranden 318
3.3.4 Kleur als wisselwerkingsresultaat van licht en duisternis 319
3.3.5 De ontwikkelingsmogelijkheden van prismatische kleur 323
3.3.6 De eenheid van het licht 325
3.4 Goethe's kleurencirkel 327
3.5 Newton en Goethe 332

4. Achtergronden en ideeënvorming ten behoeve van de docent 334
4.1 Verruiming van de licht- en kleurenleer 334
4.2 Licht- en duisternisruimte 335
4.2.1 Het karakter van de licht- en duisternisruimte 337
4.2.2 Vier aspecten van de licht/duisternisruimte 339
4.3 Beeld- en tastnatuur 346
4.4 Fenomeen, veld en sfeer 347
4.5 Absorptie, radiatie, spiegeling en verstrooiing 349
4.6 Geschiedenis van het licht- en kleuronderzoek 350
4.7 Meervoudige systemen 352
4.8 Aarde, zon en sterren 354

1. INLEIDING

1.1 Natuurkunde in de 12e klas

Het Vrije Schoolleerplan wil aansluiten bij de psychische ontwikkeling van de leerlingen die zich door de lagere en middelbare schooltijd heen van jaar tot jaar voltrekt. De twaalf jaren Vrije Schoolonderwijs kunnen in drie maal vier jaar onderscheiden worden. De eerste overgang ligt aan het einde van de vierde klas, de tweede aan het eind van de achtste klas.



De eerste overgang hangt samen met de ik-ontwikkeling (zie deel I, hoofdstuk 1) en kan vergeleken worden met het natuurkundige proces van dooien en bevriezen. Aan de ene kant worden de kinderen vrijer en beweeglijker, aan de andere kant ontstaat meer standvastigheid en eigen wil. Ook al kan deze omslag in het zieleleven turbulent verlopen omdat de kinderen zich bijvoorbeeld van hun ouders meer gaan losmaken, lichamelijk gezien verloopt deze overgang harmonisch. Rond deze leeftijd vormt het lichaam een goed harmonisch geheel, hartslag en ademhaling zijn evenwichtig op elkaar afgestemd in de verhouding 4 : 1. Typerend voor ontwikkelingen die samenhangen met het ik is, dat zij harmonie, gezondheid en zelfstandigheid brengen.

De tweede overgang rond het veertiende levensjaar hangt samen met de astrale of zieleontwikkeling en kan vergeleken worden met het proces van koken en condenseren. Aan de ene kant gaan de kinderen volledig op in de buitenwereld en moeten ze daar houvast zien te vinden, zoals het kookproces ook vol beweeglijkheid en chaos is. Aan de andere kant vindt er een gigantische verdichting plaats, die als een soort innerlijke regen of hagelbui neervalt in de vorm van gevoelens van twijfel en onzekerheid. Verlopen ik-ontwikkelingen vrij abrupt, astrale ontwikkelingen duren lang, brengen veel verandering en onzekerheid met zich mee en disharmonie tot in het lichamelijke toe. De leerlingen zijn blootgesteld aan vele eenzijdige ontwikkelingen zoals vereenzaming, drugs, terreur, seksuele wellust en drankmisbruik. Het vinden van een eigen standvastig centrum in de veelheid aan veranderingen vraagt jaren van de leerlingen. Rudolf Steiner geeft voor een harmonisering van deze extremen het advies

de blik naar buiten te richten. Interesse ontwikkelen voor de natuur, voor cultuur, techniek en medemens.

De 12e klas leerling staat op het einde van dit minstens vier jaar durende turbulente proces. De leerlingen hebben langzaamaan een eigen centrum gevonden. Er vindt nu een volgende ik-ontwikkeling plaats van sterke verinnerlijking, die optimaal verloopt als de zieleontwikkeling zich niet vastzet in te losse of te vaste meningen en leefgewoonten, maar als de leerling beleeft: "Ik bén niet m'n gevoel, lichaam, mening, maar ik héb gevoelens, meningen, enzovoorts." Opnieuw brengt het ik een harmonische ontwikkeling. Zo kan een weliswaar kwetsbare en zoekende, maar zichzelf niet verliezende levenshouding ontstaan, die ontwikkeling naar menswording nastreeft: het leven met vragen, die geen antwoord laten afdwingen, het leven met je eigen bepaaldheden die om ontwikkeling vragen, de wil tot samenleven en -werken met anderen in verbondenheid en interesse. De leerlingen beleven zich als staande op een drempel: innerlijke vragen als "Kan ik verder komen in mijn ontwikkeling, kan ik de ander vinden?" markeren deze grenservaring.

De natuurkundeperiode lichtleer kan aan deze ontwikkeling een bijdrage leveren, omdat de mens zich op een soortgelijke wijze tot het licht verhoudt als de 12e klas leerling tot zichzelf en de wereld. Licht vormt een ándere wereld dan de tastbare. Je moet een innerlijke drempel overschrijden om die wereld te kunnen bevatten. Zoals het denken als een soort innerlijk licht de samenhang tussen de dingen zichtbaar maakt, maar ook steeds weer nieuwe vragen oproept, zo maakt het licht de dingen zichtbaar, terwijl het zelf ontastbaar is en daardoor moeilijk te bevatten. Veel lichtfenomenen spelen zich ook letterlijk aan grenzen af, zoals de rand- of buigingsverschijnselen en de gekleurde randen van een door een prisma vallende lichtbundel. Om zulke fenomenen in hun samenhang te kunnen doorzien moet steeds weer de relatie worden gezocht tussen de lichtbron en de omgeving, tussen binnen en buiten. Vervolgens kan men met de leerlingen de stap maken het licht en de grensfenomenen in samenhang te brengen met menselijke bewustzijnsprocessen. Daarmee heeft men een eerste stap gezet op weg naar de verbinding tussen mens en wereld.

Een volgende stap is de vraag naar de geestelijke werkelijkheid van de natuur. Of en in hoeverre men deze vraag aan bod laat komen zal in hoge mate van de klas afhangen. Dat de mens een ziele/geestwezen is valt meestal goed te bespreken in een 12e klas. De vraag of de natuur ook geestelijk is, ligt veel moeilijker. Welk wezen is verbonden met het licht of met een kleurfenomeen als het avondrood? Leerlingen in een 12e klas zijn er aan toe een echte wezensontmoeting met zichzelf of met anderen

aan te gaan. Daarom kan men ook de wezensontmoeting met de natuur ter sprake brengen, al is het maar als mogelijke vraagstelling.

In dit hoofdstuk over de 12e klas zullen verschillende kleurfenomenen en optische fenomenen behandeld worden. Niet aan bod komen chemische effecten, zoals het fotoëlektrisch effect en pigmentkleuren. Voor verschijnselen als regenboog en noorderlicht wordt verwezen naar het boek van Walther Bühler: *Nordlicht, Blitz und Regenbogen*. De met licht samenhangende apparatuur, zoals het fototoestel, de verrekijker en de interferometer worden in dit boek ook niet behandeld, evenmin als onderwerpen als holografie en de relativiteitstheorie, hoewel die in de 12e klas zeer zeker aan de orde kunnen worden gesteld.

1.2 Opbouw van de periode

De opbouw van de periode zou direct moeten voortvloeien uit de ontwikkelingsdoelen die men stelt. In een 12e klas gaat het er niet alleen om leerlingen iets te laten ervaren, maar bovenal hen een manier van denken bij te brengen die recht doet aan de fenomenen. Daarbij staat niet de mathematische benadering centraal, maar wordt primair gezocht naar een beschouwingswijze, die beter bij de leerlingen past en wellicht ook een andere wetenschappelijke toegang biedt tot de lichtfenomenen dan de huidige materialistische en modelmatige aanpak. In het werken met de leerlingen kan men afwisselend drie didactisch/pedagogische invalshoeken volgen, de methodische, de thematische en de geschiedkundig-filosofische werkwijze.

A. De methodische weg

In het kennisproces kan men de volgende vijf stappen onderscheiden:

1. Nauwkeurige observatie en exacte beschrijving.
2. Het ontwikkelen van natuurgetrouwe voorstellingen.
3. Begripsmatig doorzien van het fenomeen.
4. Voortgaande inleving in het fenomeen, zodat een relatie gelegd wordt tussen innerlijke beleving en uiterlijk verschijnsel.
5. Het beleven van het wezen van het fenomeen in de verschijning, de geest in de natuur.

Met het benoemen van deze stappen is niet gezegd dat zij in het didactische proces altijd systematisch doorlopen moeten worden. Men kan bijvoorbeeld met een heel eenvoudig fenomeen aanvangen bij stap 4, om vervolgens door het verder grondvesten en verbinden met de waarneming terug te gaan naar stap 1 en dan te eindigen met stap 5.

B. De thematische weg

Goethe volgt in zijn kleurenleer naast de beschreven methodische ook nog een thematische weg.

1. Hij begint met een fenomeen waar de mens zelf deel van is, zoals de vraag hoe fixatie van een beeld op de mens inwerkt (nabeeld).
2. Vervolgens gaat hij over op fenomenen die objectief (met een scherm) én subjectief (de mens wordt zelf in de proefopstelling opgenomen) kunnen worden uitgevoerd, maar die niet afhankelijk zijn van onze lichamelijkheid, zoals een prisma-fenomeen. Dit gebied van fenomenen omvat feitelijk de hele kosmos.
3. Als men hier lang genoeg heeft vertoefd, dringt de vraag zich op naar de werking van een fenomeen als kleur op de mens. Hoe werkt rood en hoe blauw op mijn gemoed?
4. Als vierde stap kan de vraag worden gesteld naar de geestelijk/morele werking van het fenomeen op de mens, bijvoorbeeld de geestelijk verinnerlijkende werking van het violet.

Goethe begint dus met de mens als lichamelijk wezen dat met de natuur verbonden is, stijgt vervolgens via de natuur op tot de hele kosmos en gaat vervolgens over tot de verinnerlijking in het ziele- en geestaspect. In alle stappen wordt gezocht naar het wezen in de verschijning.

C. De geschiedkundig-filosofische weg

Men kan ook kiezen om de periode meer vanuit de geschiedkundige ontwikkeling te geven en daarbij het accent te leggen op het natuurfilosofische aspect. Dit houdt ook in dat men steeds de vraag naar het wezen van het verschijnsel stelt naar aanleiding van de concrete waarneming. Zo'n vraag is echter niet als een informatievraag op te vatten. Hij verwijst naar een grenservaring: men zoekt de hogere ervaring in de concrete ervaring die zich al doende vormt.

Het is belangrijk zelf de methodische en thematische weg steeds goed in het bewustzijn te hebben en als elkaar aanvullende werkwijzen te hanteren. Beide wegen kunnen dan in de loop van de periode besproken worden. De geschiedkundig-filosofische werkwijze kan zo men wil ook vrij gehanteerd worden.

We willen nu een aantal manieren bespreken waarop men de lesstof kan indelen. Deze indelingen kunnen naast elkaar gebruikt worden:

1. Kwalitatief en kwantitatief

In deze periode kan beter niet het accent op het kwantitatieve element gelegd worden, daarbij zou men voorbijgaan aan de pedagogische

mogelijkheden die de periode biedt. Slechts bij een relatief klein aantal onderwerpen kan men, wanneer het fenomeen daar duidelijk aanleiding toe geeft, het wiskundige aspect aan bod laten komen.

kwalitatief:
- oog: vorm van het oog, waarnemen van contrast, kleur en vorm, nabeelden, kleurenblindheid, gezichtshoeken, machlijnen, gezichtsbedrog (is beoordelingsbedrog);
- natuurfenomenen: hemelkleuren, breking in water, prisma, spiegeling, enz.;
- chemische kleuren;
- psychische en geestelijk-morele werking van kleuren en van licht en duisternis;

kwantitatief:
- fotometrie (vetvlekmethode als vergelijkende methode);
- lichteenheden;
- kleurgetal (golflengte), spectrometer;
- brekingsindex;
- lenzen/spiegel-formule.

2. *Natuurrijken*

Licht, donker, kleur en vorm zijn ruimtefenomenen en niet zozeer tijdsfenomenen. Het procesmatige karakter is gering. Men zou de volgende relaties kunnen leggen: de spectroscopie past men toe op de kosmos, op de zon en de sterren; de hemelkleuren openbaren zich in de atmosfeer; spiegeling worden we gewaar aan wateroppervlakken en schaduw aan vaste objecten. Andere fenomenen laten zich op natuurlijke wijze indelen:

natuur	kosmos	spectroscopie, lampen
	atmosfeer	hemelkleuren, heffing, polarisatie
	wateroppervlak	breking, spiegeling, lenzen, spiegels
	aarde	schaduwbeeld, beeldvorming, dubbele breking, polarisatie, fluorescentie, buigings- en interferentierandbeelden
ondernatuur	elektriciteit	fotoëlektrisch effect

3. *Historisch*

De historische ontwikkeling van het denken over licht en de bewustzijnshouding van de mensheid ten tijde dat die gedachten ontwikkeld werden, kan de leidraad zijn om de periode vorm te geven. Men kan

dan bij de Grieken aanvangen en via de Middeleeuwen, Huygens, Newton, Young, Fresnel en Goethe in de moderne tijd uitmonden met de energetische, quantumfysische en relativistische opvattingen. Zie ook in dit verband het boek van Arthur Zajonc: *Het licht zien.*

4. Wiskundig

Zoals de 9e klas periode warmte vooral over tijdsprocessen handelde, zo gaat deze 12e klas periode licht vooral over ruimtetoestanden. De meetkundige grondelementen van de ruimte zijn punt, lijn, vlak en volume. Aan de hand van deze vier grondelementen kan de lesstof ook ingedeeld worden:

volume:	hemelkleuren, oplichten van water (verstrooiing), heffing, gasbuiseffecten;
vlak:	polarisatie, spiegeling, dunne laagjes (zeepbel e.d.), breking, dubbele breking;
lijn:	randfenomenen (buiging en interferentie aan een rand, spleet, twee spleten, tralie);
punt:	camera obscura/lucida, mist-, regen- en ijskristalfenomenen, colloïdale oplossingen.

5. De polariteit van licht en duisternis

De indeling van de lesstof aan de hand van de polariteit licht-duisternis kan een leidraad voor de docent zijn en kan ook met de klas besproken worden. Het is ook mogelijk om deze indeling, die een sterk begripsmatig karakter heeft, tijdens de eerste week aan de periode mee te geven in de vorm van een vraagstelling. De interactie tussen licht en duisternis kan op verschillende manieren plaatsvinden, waarbij verschillende fenomenen optreden:

licht en duisternis zijn beide actief op hun manier:	belichting van voorwerpen;
door de interactie ontstaan nieuwe fenomenen:	hemelkleuren, breking, dunne laagjes fenomenen;
de duisternis drukt zijn stempel op de lichtwerking, zodat een gestructureerd patroon ontstaat:	polarisatie;

de duisternis fixeert de expanderende lichttendens. Licht wordt gevangen, gekooid in structuren: buiging en interferentie.

1.3 Zelfstandig werken

De laatste jaren is er in het hele voortgezet onderwijs veel aandacht voor het vraagstuk van de zelfwerkzaamheid van leerlingen. Dit komt met name tot uitdrukking in de plannen rond het studiehuis, een onderwijsvorm die binnen het gangbare onderwijs is ontwikkeld voor de hoogste klassen en die ruwweg een combinatie inhoudt van traditionele lessen afgewisseld met zelfstandig werken onder begeleiding. De oorzaak dat men zich met deze thematiek bezighoudt is gelegen in de consumptieve houding die vaak bij leerlingen gesignaleerd wordt. Men is op zoek naar onderwijsvormen die de leerlingen directer betrokken laten zijn bij de lesinhoud. Ook binnen het Vrije Schoolonderwijs, waar de nadruk gelegd wordt op een onderwijsaanbod dat zoveel mogelijk tot stand komt door de wisselwerking tussen leraar en leerlingen, ontmoet men vaker dan voorheen een te consumptieve houding bij de leerlingen en ontwaakt het besef dat deze tijd vraagt om nieuwe onderwijsvormen, die de zelfstandigheid van de leerlingen directer aanspreken. Binnen het 12e klas programma bestaat al jaren aandacht voor het thema zelfwerkzaamheid. Zo laten veel Vrije Scholen 12e klas leerlingen een aanzienlijk deel van het schooljaar aan een zelfgekozen thema werken, het eindwerkstuk, waarover dan tegen het einde van het schooljaar een openbare presentatie volgt. Binnen het ambachtelijke of kunstzinnige onderwijs wordt in de 12e klas vaak gewerkt aan een meesterproef. De laatste tijd wordt er door vele docenten ook voor het periodeonderwijs gezocht naar mogelijkheden om de zelfwerkzaamheid van leerlingen te bevorderen.

Omdat deze thematiek nog niet eerder expliciet aan bod kwam, schetsen we hier in het kort ook de mogelijkheden om in eerdere leerjaren van het voortgezet Vrije Schoolonderwijs het zelfstandig werken te bevorderen.

In klas 9 ontwaken de leerlingen in het eigen innerlijk, krijgen zij een zekere mate van zelfbewustzijn en kunnen daarom aangesproken worden op eigen verantwoordelijkheid. Echter nog niet voor een verantwoordelijkheid naar de omgeving toe, want een bewustzijn voor de eigen plaats binnen de groep is er op deze leeftijd nog niet. Wel kunnen de leerlingen aangesproken worden op wat uit hun eigen handen komt, huiswerk, ambachtelijke opdrachten, e.d. De gemiddelde 9e klasser denkt zwart-wit, een antwoord op een vraag is goed of fout en juist aan op-

drachten die zo'n karakter hebben, zoals bijvoorbeeld het aansluiten van een lamp die alleen brandt als je je werk goed hebt gedaan, ontwaakt het zelfbewustzijn op deze leeftijd. Kleine doe-opdrachten passen in dit verband en spreken de leerlingen op een bij de leeftijd passende wijze aan op hun eigen verantwoordelijkheid. Bijvoorbeeld het zelf bedenken en uitvoeren van een eenvoudige proef.

In de 10e klas ontwaken de leerlingen voor allerlei soorten relaties in de wereld, relaties binnen de natuur, sociale relaties, enzovoorts. Deze relaties leren verzorgen maakt deel uit van het jaarthema. Op sociaal gebied is het goed mogelijk hier aangepaste werkvormen bij te vinden, echter niet vanuit een individuele verantwoordelijkheid, dat zou meer in de 11e klas passen, waar het individuele zelfbewustzijn ontwaakt. Groepswerk vormt wel een mogelijkheid. Ook kan men een leerling een sociale rol toebedelen, bijvoorbeeld Galileï's gezichtspunten verdedigen tegenover zijn tegenstanders. Zo spreekt men de leerlingen aan op de verantwoordelijkheid die bij een sociale functie hoort.

In de 11e klas ontwaakt een individueel bewustzijn doordat de leerlingen zich afzetten tegenover de groep. 11e klassers polariseren dan ook graag. Inhoudelijk komt men hieraan tegemoet door de lesstof vanuit polariteiten aan te bieden, bijvoorbeeld het in proces en op het oneindige gericht zijn van het elektrische veld tegenover het naar vorm en verdichting tenderen van het magnetische veld. Wanneer je tijdens klassegesprekken als leraar een te vast standpunt inneemt, moet je dat alleen doen om een voorbeeld te geven hoe je in een discussie als individu overeind kunt blijven, terwijl iedereen tegen je is. Een vast standpunt van een docent lokt namelijk op deze leeftijd een polariserende beweging in de hele klas op. Het is ook heel goed mogelijk leerlingen in een debat het eigen standpunt te laten verdedigen. Ook kan men de leerlingen een werkstuk laten maken over een deelthema van de periode.

In de 12e klas is het zelfbewustzijn nu zover ontwikkeld dat de leerlingen niet alleen oog hebben voor hun individuele eigenheid, maar ook voor de eigenheid van de ander. De vraag welke plaats het individu inneemt binnen de wereld als geheel, vormt een belangrijk thema voor de 12e klas. Van daaruit ontstaat bij leerlingen de motivatie om een bijdrage aan de periode te leveren op grond van hun eigen vermogens. Dit gegeven kan men zeer concreet maken, bijvoorbeeld door te stimuleren dat leerlingen niet van alle aangeboden lesstof een verslag te maken, maar door hen een keuze van een deelthema te laten maken uit het aanbod van die dag en hiermee zelfstandig aan de slag te gaan, door een mediatheek te raadplegen, door zelf extra proeven te doen of door zelfstandig na te gaan denken over het aangebodene. Ook kan men leerlingen de mogelijkheid bieden een deel van de aangeboden lesstof op enigerlei kunstzinnige wijze

uit te werken, zodat zij ook nog vanuit een andere zielelaag met de lesstof bezig gaan. Bijvoorbeeld door een gedicht te schrijven over een bepaalde kleur en daarin het wezenlijke van die kleur trachten uit te drukken. Dagelijks bespreekt men dan niet alleen de gewone lesstofverslagen van de vorige dag, maar ook de 'speciale opdrachten' die de leerlingen zichzelf hebben gesteld. Aan deze werkwijze zit een gevaar verbonden. Leerlingen kunnen op allerlei wijzen verzanden in deze mogelijkheden om tot zelfwerkzaamheid te komen, zodat er juist minder uitkomt. Bijvoorbeeld doordat zij veelvuldig kiezen voor het maken van een speciale opdracht, daar weinig speciaals van weten te maken, wat dan demotiveert, zodat zij dan verder ook tot weinig komen. Dit mechanisme kan men voorkomen door de leerlingen per dag van een deel van de lesstof een traditioneel verslag te laten maken en de speciale opdracht op het andere deel te betrekken. Verder moet men de leerlingen voldoende feed-back geven in het werk dat zij aan deze speciale opdrachten besteden, het beste in klasseverband zodat elk besproken voorbeeld exemplarisch werkt voor de hele klas. Tenslotte is het maken van een werkstuk rond een zelf gekozen deelthema van de periode aan te bevelen. Zowel de optica als de kleurenleer bieden daartoe vele mogelijkheden.

1.4 Het oproepen van vragen

Het oefenen van het zelf omschrijven van fenomenen in plaats van gebruik te maken van bestaande definities is een van de essentiële opgaven van deze periode. Het gaat er niet primair om de leerlingen met een handvol lichtfenomenen te laten kennismaken, maar om ze aan de hand van zulke verschijnselen een leerproces te laten doormaken. Een heel eenvoudige proefopstelling kan goed als inleiding gebruikt worden om te oefenen in het onderscheiden van waarneming, vooronderstelling en begrip.

Wanneer in de klas gevraagd wordt wat hier waar te nemen valt, dan zal er vaak opgemerkt worden dat het licht van de lamp/zon naar de omgeving stroomt en dat dit een schaduw geeft. Dit is echter geen waarneming. We zien geen proces maar een toestand. Het is voor de waarneming niet nodig om de natuur van wat tussen de dingen is in te vullen. Geef dus geen definities van licht en werk niet met lichtstralen, een stromend medium, golven, deeltjes of fotonen. Als de leerlingen bemerken dat het licht, maar ook de donkere ruimte achter het voorwerp niet te zien zijn, treedt verwondering op en gaan ze zich vragen stellen.

We kunnen nu de lichtsterkte van de lamp verhogen en vragen of de schaduw donkerder wordt. Eerst zullen leerlingen misschien geneigd zijn te zeggen dat dit inderdaad zo is. Dan zal iemand opmerken dat dit niet mogelijk is, omdat het een schaduw is. Vervolgens kan men een beschreven vel papier in de schaduw houden en de lichtsterkte nogmaals variëren. Dan blijkt het papier met een grotere lichtsterkte wél leesbaar. Op deze wijze komen de leerlingen los van ingebakken vooronderstellingen. Het niet invullen van het onnoembare maar dit wel willen benaderen, is behalve een moderne ook een vruchtbare houding om tot het wezen van de fenomenen door te dringen. Een vraag als "wat is licht?" kan nooit gelijk gedefinieerd of beantwoord worden. Men kan het wezen van een fenomeen, net als bij de ontmoeting van een medemens, wel beleven, maar niet definiëren. Voelen leerlingen zich met het wezen van een fenomeen verbonden, herkennen zij het onnoembare, dan werkt dit als een stimulerende kracht door in het eigen leven.

We keren nu terug naar de proefopstelling en proberen te beschrijven wat we waarnemen:

- De zon of lamp is een relatief klein, fel oplichtend, object. Men kan er nauwelijks naar kijken en men ziet geen contour of oppervlak. Kijkt men door een beroet of zeer donker glas, dan is de omgeving volledig donker en ziet men de contouren van een fel lichtend vlak.
- Het ondoorzichtige voorwerp is aan de kant van de zon stralend licht van kleur. Aan deze zijde tekent de contour zich af tegen een minder lichte tot donkere omgeving. Aan de schermzijde is het voorwerp donker en dof van kleur. De contour tekent zich hier af tegen een lichtere omgeving.
- Het hele scherm is op één plek na volledig lichtend wit.
- Houdt men het oog vlak bij de lamp en kijkt men van de lamp vandaan, dan is de hele omgeving lichtend en ziet men geen schaduwen.
- Verplaatst men het voorwerp naar het scherm toe, dan wordt de donkere vlek op het scherm kleiner en het voorwerp aan de schermkant lichter.

- Er is een relatie tussen de helderheid waarmee een voorwerp oplicht en de afstand tot het lichtende object, in dit geval het scherm.
- Ook het scherm licht feller op als de lamp er dichterbij staat.
- Beweegt men met één oog in de richting van de lamp kijkend langs het scherm, dan ziet men steeds de lamp, behalve daar waar het scherm donker is.

Hieruit blijkt dat het meelichtende, ondoorzichtige scherm met zijn licht/donker patroon een beeld laat zien van de omgeving. Ook de schaduwkant van het voorwerp laat zien hoe licht zijn omgeving is.

- Beweegt men de hand tussen lamp, voorwerp en scherm, dan is deze overal lichtend aan de naar de lamp toegekeerde zijde, maar veel donkerder tussen het scherm en het voorwerp.

De ruimte waar dingen oplichten zullen we *lichtruimte* noemen en de ruimte waar dingen donker zijn overeenkomstig *donkerruimte*.

- Houdt men een beschreven vel papier naast het voorwerp en kijkt men naar de tekst door een licht- of een donkerruimte, dan wordt deze niet meer of minder leesbaar.

De licht- en donkerruimte zélf zie je niet. Kijken door een licht- of donkerruimte bevordert of vermindert de leesbaarheid van een tekst niet. De leesbaarheid wordt slechts bepaald door de lichtende dingen in de omgeving van het papier en de mate waarin het papier zelf kan oplichten. Zo is ook de hele kosmische ruimte door en door licht, maar toch zien wij hem donker, omdat er behalve planeten en satellieten geen voorwerpen zijn die kunnen oplichten. Een licht- of een donkerruimte kan men dus niet waarnemen, alleen lichte of donkere objecten en contouren.

- Maakt men de lamp groter of kleiner (neem hiertoe bijvoorbeeld een matglas-lamp, dek deze af en varieer de opening), dan wordt de schaduwvlek op het scherm groter en onscherper, respectievelijk kleiner en scherper. Bij een grote lamp of lichtopening is de overgang van lichtend scherm naar schaduwplek breed. Kijkt men vanuit dit halfschaduwgebied terug naar de lamp, dan ziet men de lamp gedeeltelijk toegedekt door het ondoorzichtige voorwerp. Bij een kleine lamp is het halfschaduwgebied kleiner en krijgt men een relatief scherpe schaduwrand. Dit fenomeen zal nog nader beschreven worden in paragraaf 2.2.

In de klas kan de beschrijving van zo'n proef, afhankelijk van de situatie, heel vluchtig of juist grondig worden uitgevoerd. Het gaat erom leerlingen bewust te laten worden van het feit dat wij licht meestal beschouwen als een continu stromend verschijnsel, terwijl dit bij nadere beschouwing niet op waarneming blijkt te berusten. In plaats van over stromend licht zullen we spreken over licht- en donkerruimte. Eventueel kan men ook spreken over licht- of donkerveld. De eigenschappen van beide zullen we nog

nader onderzoeken. Voorlopig volstaan we met de vaststelling dat beide soorten velden niet waarneembaar zijn. Alleen substanties als stenen, nevel, stofjes in de lucht en dergelijke zijn waarneembaar als nuances van licht-donker en kleur.

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 karakteristieken 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.

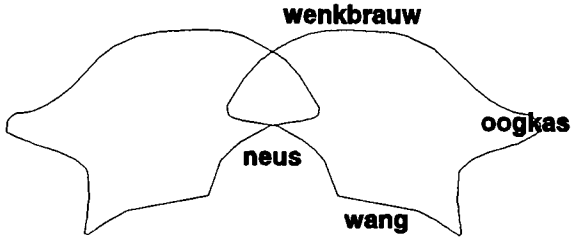
Van grotvissen, die nooit in daglicht hebben geleefd, is bekend dat zij geen ogen hebben. Brengt men zulke vissen langdurig in water met daglicht, dan ontwikkelen zij ter plaatse van de ogen een lichtgevoelige huid, een aanzet tot ogen. Paarden die in mijnen werden gebruikt en altijd ondergronds bleven, 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/donker-grenzen.
- 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 kleur-vlak 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.

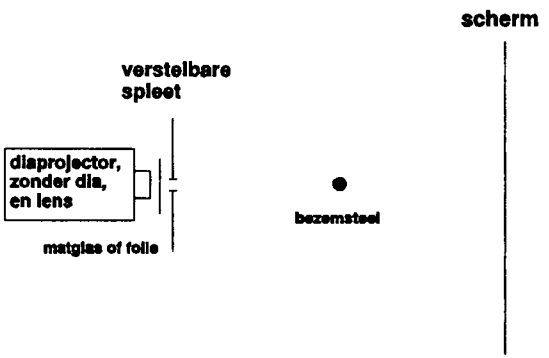
Verschijnselen die de mens ziet waarbij het oog zélf betrokken is, zijn net zo objectief, want voor alle mensen min of meer gelijk, als verschijnselen die alleen door de buitenwereld bepaald worden. Zulke fenomenen demonstreren dat de mens niet alleen innerlijk, maar ook in de

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.

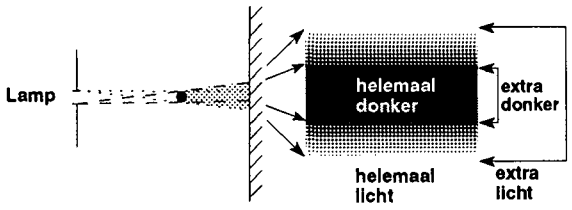
Bekijkt men bij daglicht de schaduw van een lantaarnpaal, dan is deze vlakbij de paal scherp en verderop steeds onscherper. We hebben hier te maken met de factoren zon, paal, grond en ruimte. Willen we dit fenomeen in de klas bestuderen, dan is de volgende opstelling heel bruikbaar:



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 halfschaduwen onderscheiden.
- Bij een flinke halfschaduw ziet men duidelijk de lichte en donkere machlijnen:

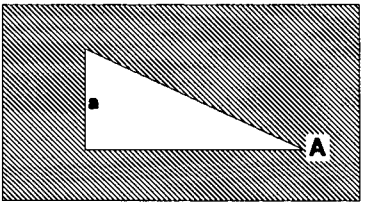


- Verschuift men het linker- of het rechterkarton van de spleet, dan verschuiven twee van de vier grenzen van de schaduw.
- Kijkt men langs het scherm gaande terug naar de lamp, dan ziet men buiten de schaduw de lamp in zijn geheel, in de halfschaduw gedeeltelijk en in de kern helemaal niet. Men kan 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

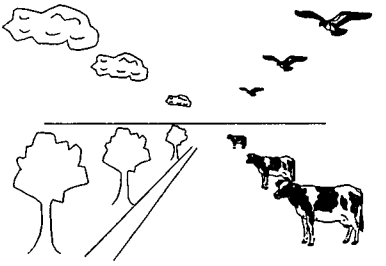
2.3.1 Afstand zien

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 *voorgrond* 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 *ooglens 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 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 spiegelende 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 spiegelende 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.

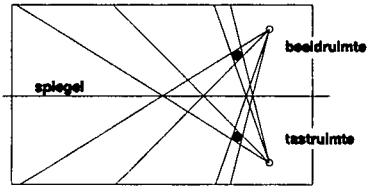
In vervolg op de verkennende bespreking kan iets genoemd worden wat door de leerlingen direct herkend zal worden, namelijk de manier waarop sommige leerlingen hun periodeschrift maken. Een enkele keer kom je wel eens tegen dat een leerling alles, maar dan ook alles zoals het door de leerkracht uitgesproken 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.

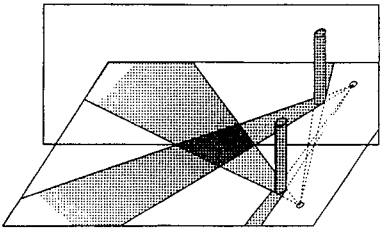
Als je in een spiegel kijkt, dan werp je een blik op een wereld die gevuld is met zuivere "beeldvoorwerpen". Het vlak van de spiegel kan je oneindig uitgebreid denken en is de grens van die "spiegelwereld". In de spiegel zien we een halfwereld van zuivere zichtvoorwerpen. Het is net als kijken door een 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 ontraadselen, 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

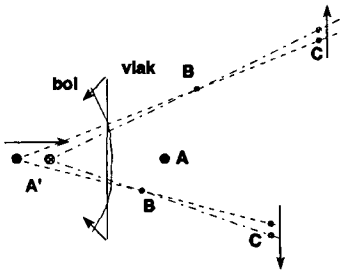
Een spiegelsituatie aan een eenvoudig gekromd oppervlak is een stuk overzichtelijker. De meeste mensen hebben uit hun ervaring een goed beeld van wat er in een kerstboombal te zien is. Het is echter toch vaak verrassend om nog eens zo'n kerstbal door te geven en erop te wijzen, hoe klein de figuurtjes 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

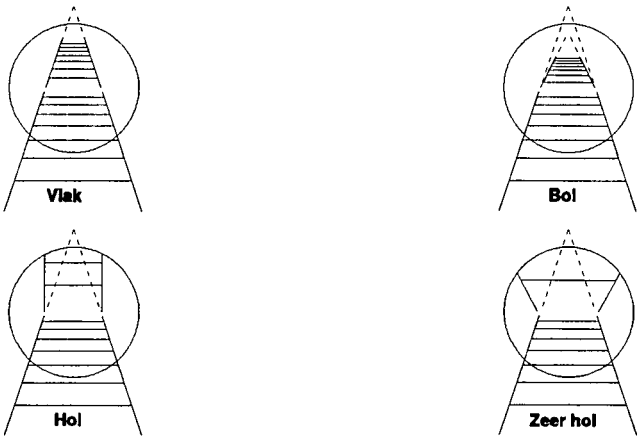
Laat nu de leerlingen links en rechts van het midden nog een tweetal B en C van zulke statieven neerzetten, zó dat ze steeds met het spiegelbeeld van statief A een uitgelijnd drietal verticale lijnen vormen. Dat kan tegelijk aan de linkerkant en aan de rechterkant van de spiegel gebeuren. Hierbij kun 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 verwijdert. 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.

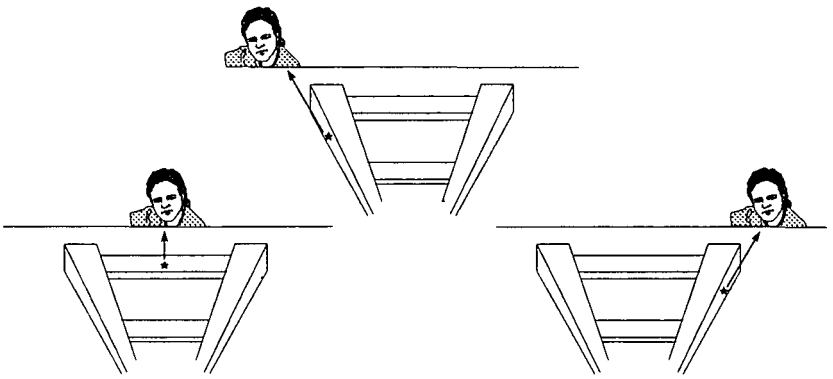


De tekening van de spiegel in de meest holle stand is niet alleen sterk vereenvoudigd, maar ook niet geheel juist. Oftewel in de echte spiegel valt nog veel meer te zien. Dat het perspectief in een holle spiegel compleet verdwijnt, is experimenteel gemakkelijk te verkrijgen. Ook de omkering van het perspectief 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 vérder 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 beschaduwd scherm wordt vaak begrijpelijker, als je vanuit het scherm naar alle mogelijke lichtbronnen kijkt.

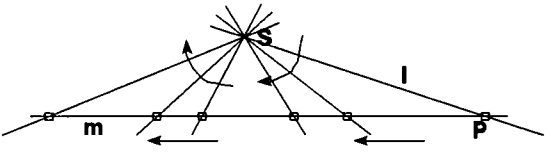
Als je nu vanuit de linkerkant van de spiegelbeeld-ladder naar de waarnemer kijkt, terwijl deze de ladder ziet in omgekeerd perspectief, dan kun je, als je over de ladder naar de andere kant loopt, de waarnemer steeds goed in het oog houden. Hij gaat meer met je hoofd mee dan een voorwerp in het oneindige. 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 schermpje. 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 spiegelende 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): $V = |\frac{b}{v}|$

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 $v=2$

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

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

Er ontstaat een verkleind, virtueel beeld, dichter achter 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:
$f=6$ en $v=2$
Het beeld is nu vergroot, nog steeds virtueel, verder achter de spiegel dan wanneer hij vlak zou zijn geweest.

Geval 4:
$f=4$ en $v=2$
Het beeld gaat verder weg en wordt groter!

Geval 5:
$f=2$ 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:
$f=1{,}5$ 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:
$f=1$ 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.

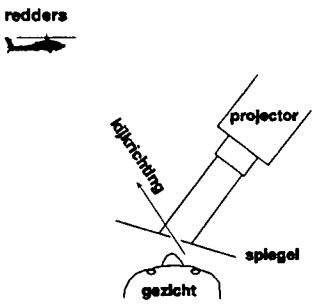
Doel van de proef:
De bedoeling van dit proefje is om uit een gebruiksaanwijzing van dit eenvoudige instrument de exacte werking te begrijpen met behulp van de spiegelwetten.

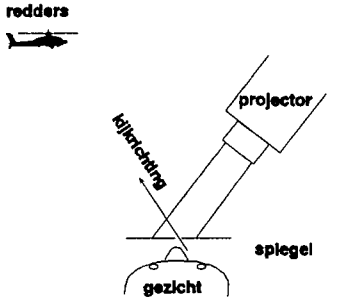
Benodigdheden:
1. een noodspiegel, dit is een dubbelzijdige spiegel met een kleine opening in het midden,
2. een heldere lichtbron (diaprojector of de zon),
3. een waarnemer op afstand.

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.

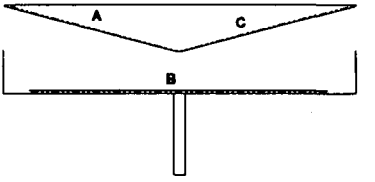
In deze tweede tekening kan je nu bemerken dat wel voldaan is aan de voorwaarden van de handleiding en dat de gereflecteerde bundel juist op de waarnemer komt.





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 onderstebo-ven wordt gezien.

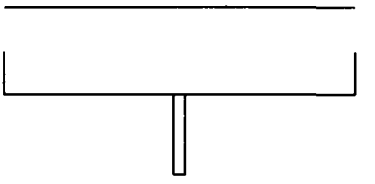


Benodigdheden:
Magische kijker op statief.

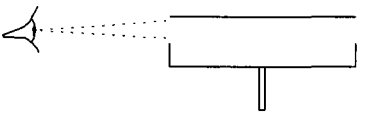
Opstelling:
Zet de kijker zo neer dat je een "buiten scène" kan zien en zelf niet te dicht bij de kijker staat.

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 verlijmde spiegeldriehoeken), 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.

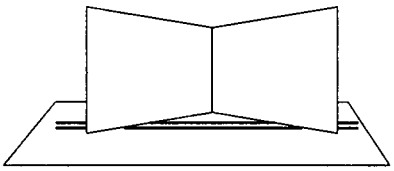
Vragen en opdrachten:
1. Bij een hoek van 180° zie je je eigen spiegelbeeld. Ga na dat dit spiegelbeeld niet identiek is met het beeld van je hoofd, gezien zonder spiegel.
2. Verklein de hoek langzaam tot 120° en beschrijf wat je ziet.
3. Probeer bij een hoek van 120° je eigen spiegelbeeld aan te kijken. 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"

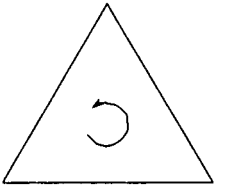
De volgende proef vraagt niet zoveel van het begrip, maar het werken in spiegelruimtes is wel erg fascinerend en vaak zeer fraai. Er wordt gebruik gemaakt van een drietal spiegels van ca 15 bij 30 cm die met de spiegeloppervlakken naar elkaar toe in de vorm van een gelijkzijdige driehoek op een stuk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

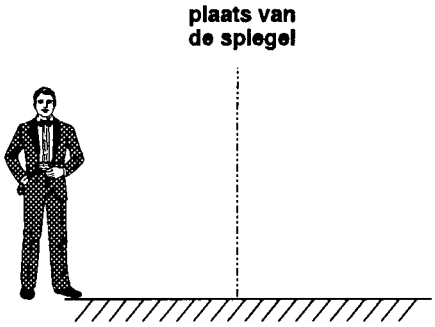
Opstelling:

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

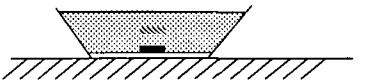
2.4.1 Beeldheffing en beeldstuwing

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 waarnemings*beelden* 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 *in*kijkt 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.

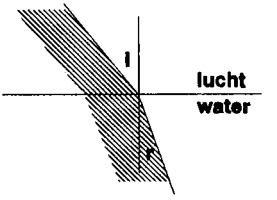
Het verschijnsel van de bodemheffing was vroeger in heldere sloten en is tegenwoordig in zwembaden mooi waar te nemen. Het is dan even wachten op het moment dat er niemand zwemt en het wateroppervlak glad is. De bodem die het dichtst bij is, ziet men het minst geheven. De bodem op een grotere afstand, 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 lichtruimte is niet zichtbaar, de plaats kan alleen zichtbaar gemaakt worden door in de lichtruimte 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 rechtlijnig, 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 *in*zuigen 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.

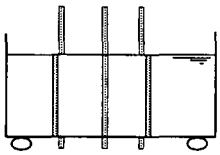
De hierboven genoemde tegenspraak komt het duidelijkst naar voren als we de leerlingen het water in laten kijken naar een schuin in het water gestoken stok. Deze lijkt naar boven geknikt, hetgeen in overeenstemming is met het verschijnsel dat we beeldheffing hebben genoemd. De licht- en schaduwbundels worden bij de overgang lucht-water juist het water *in*geknikt. 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 *in*gezogen wordt als de lichtruimte. De afbuiging van onze blikrichting doet ons het beeld op een andere plaats aanwijzen, naar het oppervlak toe geheven.

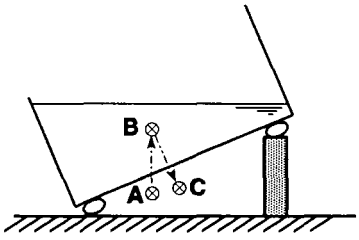
Bij de beeldstuwing doet zich een soortgelijke schijnbare tegenspraak voor. Vanuit het water kijkend ziet men de stok naar boven geknikt, terwijl de lichtkegel van een onderwaterlamp bij het passeren van de water/luchtgrens juist gespreid wordt. Ook hier is het weer de afbuiging van onze blikrichting 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 planparallelle verschuiving. Deze verschuiving vindt niet alleen, zoals in de figuur getekend, 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.



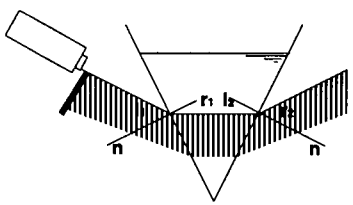
Als eerstvolgende stap in de reeks kijken we door twee grensvlakken die nog wel vlak maar niet meer evenwijdig zijn. Dat gaat het gemakkelijkst door het (halfvolle) aquarium scheef op te stellen. De twee grensvlakken krijgen dan een snijlijn, de "brekende rand" genaamd. Het beeld van een voorwerp wordt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

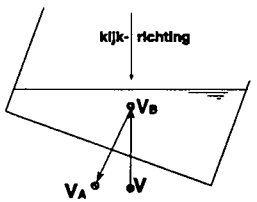


naar de brekende rand toe verplaatst. Deze verschuiving kan inzichtelijk gemaakt worden door de respectievelijke beeldverplaatsingen niet tegelijk te beschouwen, maar alsof ze na elkaar, in ieder geval onafhankelijk van elkaar plaatsvinden. In de figuur hiernaast staat het aquarium een beetje scheef. 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 prismavormige 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 hoef je bij deze proeven nog niet direct de aandacht op te vestigen, ze zullen later besproken worden (paragraaf 3.3.1).

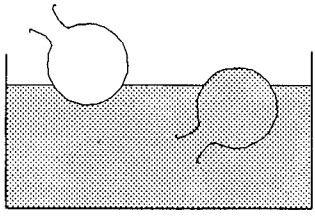
Het is hier interessant om even stil te blijven staan bij de twee onderscheidbare wijzen waarop je over deze verschijnselen kan spreken. Je kan spreken over licht- en donkerruimtes die bij een water/luchtgrens een knik maken en je kan spreken over beeldverschuivingen. Deze twee manieren vullen elkaar 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 knikte 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.





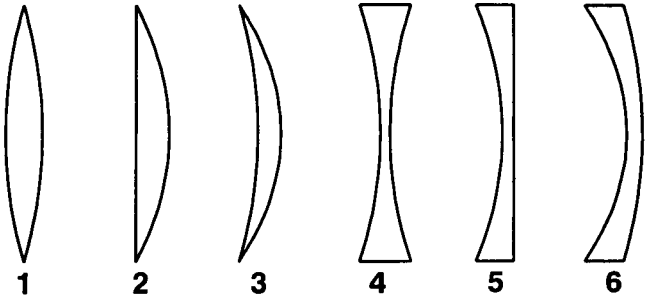
2.4.3 Beeldvergroting/verkleining

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:

bolle lens

holle lens

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 lichtruimtes 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 luchtruimte 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

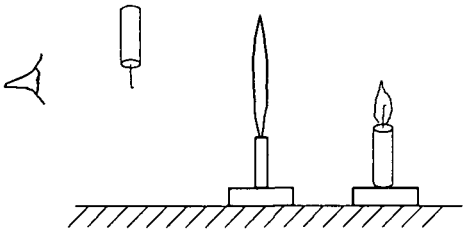
voorwerpen die je door een holle lens ziet zijn dichterbij de lens dan de voorwerpen zelf, net zoals bij een bolle spiegel. Bij een bolle lens ligt het wat ingewikkelder. Als je een bolle lens vlak voor het oog houdt, dat wil zeggen dat het brandpunt binnen het nabijheidspunt* gelegen is, dan kan een 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 fenomenologsiche 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.

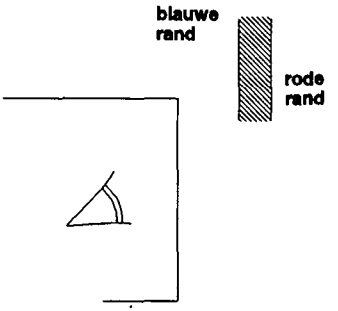
Ten aanzien van de buigings- en interferentieverschijnselen kunnen drie verschillende typen fenomenen onderscheiden worden:

randfenomenen	*vlakfenomenen*	*beeldfenomenen*
proef van Fresnel	zeepbellen	interferometer
proef van Young	oliefilm	van Michelson en
biprisma	newtonringen	van Fabry Perot
halflenzen Billet	glasplaatjes op elkaar	hologram

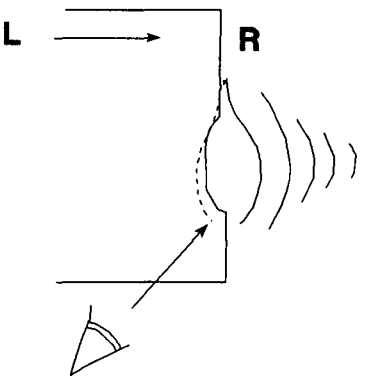
De randverschijnselen aan één rand zullen als uitgangspunt voor nader onderzoek gekozen worden. Er zal hier een gerichte selectie van proeven beschreven worden die een *synthetisch* karakter hebben (zie paragraaf 3.2.1)

- 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 microscoopglaasje plakken, zodat de proefondervindelijk vastgestelde spleetbreedte behouden blijft. Dit glaasje kan men dan de klas rond laten gaan.

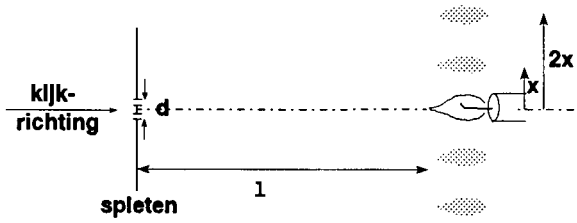
- Houd vervolgens de mesjes niet naast maar twee centimeter voor elkaar en bedek met het voorste mesje de vlam tot de randstrepen ontstaan. Beweegt men nu het achterste mesje dwars op de kijkrichting zo, dat de spleet langzaam gesloten wordt, dan ziet men aan de zijde van het achterste mesje de randstrepen 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 wijdere 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.

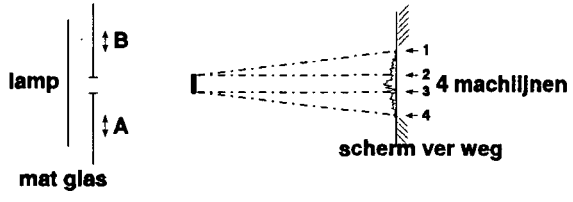


Kijkt men door twee of meer spleten, dan ontstaat een verdergaande regelmaat van het patroon. Bij een tralie met een toenemend aantal lijnen neemt naast de regelmaat ook de wijdte van de beeldherhaling toe. Men herkent dan ook heel duidelijk de vlamvorm. Er bestaat een lineaire getalsverhouding tussen schermafstand, spleetafstand en wijdte van het beeld. Er geldt: $\frac{x \cdot d}{l}$ = **constant** .

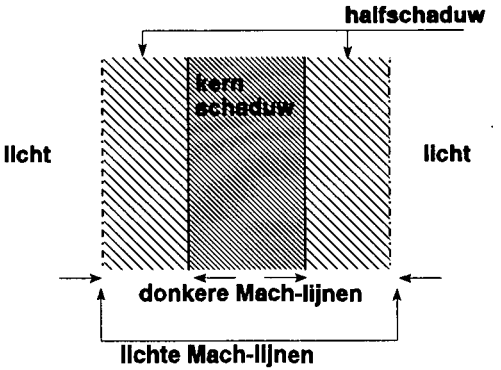
Deze constante is typisch voor de kleur van de betreffende lichtbron en zullen we daarom het kleurgetal noemen. Dit getal wordt ook bij de proeven aan dunne laagjes gevonden.

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 lengteeenheid. 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.



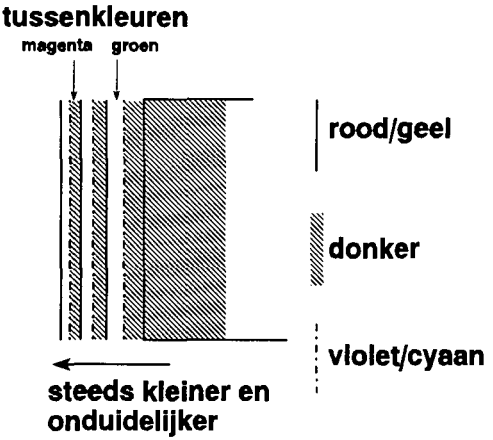
- Maak de reeds in paragraaf 2.2 beschreven proefopstelling, waarmee een schaduwbeeld van een voorwerp kan worden gemaakt (zie figuur vorige pagina).
  Verschuift men het strak afgesneden karton A, dan verschuiven de machlijnen 1 en 3 perspectivisch mee. Maakt men de lamp middels de spleet AB kleiner, dan worden de halfschaduwen 1-2 en 3-4 overeenkomstig kleiner. De door de mens waargenomen lijnen van Mach komen dan dichter 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.



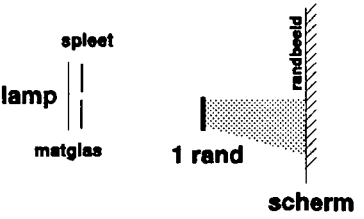
De stuwing aan de randen, die de mens vroegtijdig waarneemt, is hier tot objectief fenomeen geworden. De machlijnen zijn dus niet het gevolg van de onvolkomenheid van het oog, maar juist van de genialiteit ervan om de spanning tussen de licht- en duisternistendens reeds zichtbaar te maken, voordat die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

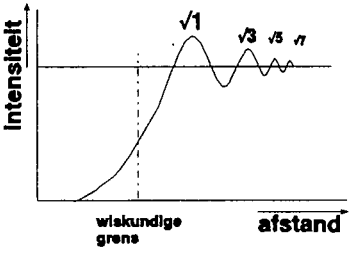
- Bij een normale schaduw hangt de vorm ervan samen met de afstand van de lamp tot het scherm en van het voorwerp tot het scherm. Bij de randfenomenen hangt de vorm in hoofdzaak af van de afstand van het voorwerp tot het scherm.
- De randen van de lamp/spleet en die van het voorwerp moeten evenwijdig, scherp en ondoorzichtig zijn, willen de randfenomenen goed zichtbaar worden.



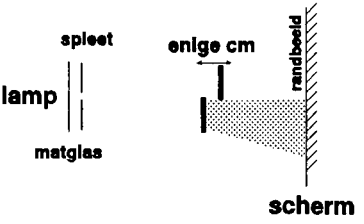
- Er ontstaan randkleuren, vergelijkbaar aan de prismatische randkleuren, met als toegevoegde kleuren groen en magenta.
- Er ontstaan meerdere afbeeldingen van de lamp/spleet met kleurranden, waarbij de rood/gele kleurrand het meest naar buiten en de lichtblauw/violette kleurrand het meest naar binnen ligt.
- Het patroon aan één rand is niet regelmatig zoals aan twee randen. De afstandsverhoudingen verlopen volgens een wortelreeks:

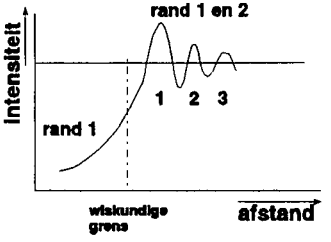
  $\sqrt{1}$, $\sqrt{3}$, $\sqrt{5}$, $\sqrt{7}$ enz.

  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 randeffecten 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. Afstandsverhoudingen 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.

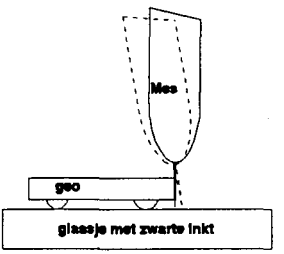
2.5.2 Practicum kleurgetal

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.

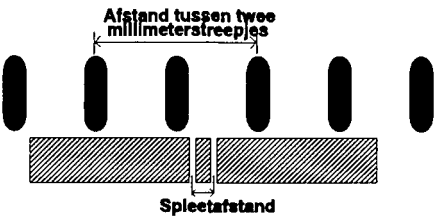


Daarna moet je met een vers, scherp breekmesje twee strepen vlak naast elkaar maken. Daartoe leg je een geodriehoek op het glaasje en trek je een snee en daarna met dezelfde stand van de geo nog een snee waarbij je het mesje een paar graden (ca 5°) schuiner houdt. Hoe dunner de sneden en hoe dichter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

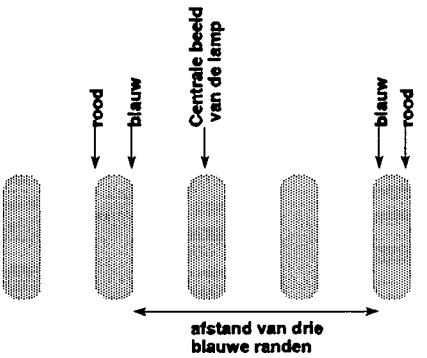
De afstand tussen de twee spleten is in de afbeelding: ..... m

Op het objectglaasje is de spleetafstand dus d = ... 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 = ... 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 = .. 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:

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

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:

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

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:

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

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 kleurenspectrum. 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 kleurringen 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 microscoopglaasjes die op elkaar gedrukt worden, zodat ze aan elkaar vastzuigen. Op de glaasjes kijken in spiegellicht geeft de contrastrijkste kleuren. Kijkt men dóór de glaasjes, dan ziet men de complementaire kleuren. Waar de glaasjes 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 zeeplaagje 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 ís 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

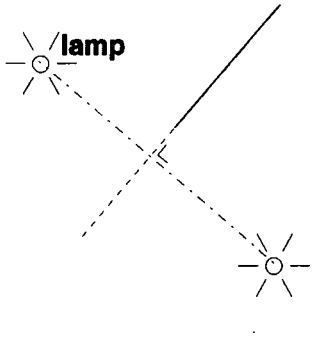
licht en duisternis geeft kleur. Dit thema wordt verder in paragraaf 3.2 uitgewerkt. Bij dunne laagjes, waar twee grensvlakken dicht bij elkaar komen, wordt de duisterniswerking, die uitgaat van deze grenslagen, sterker. Dit is een fenomeen dat typisch met de oppervlakte/rand te maken heeft. Twee oppervlakken, 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.

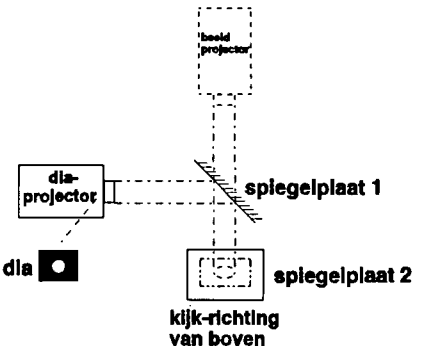
2.7 Polarisatie

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.



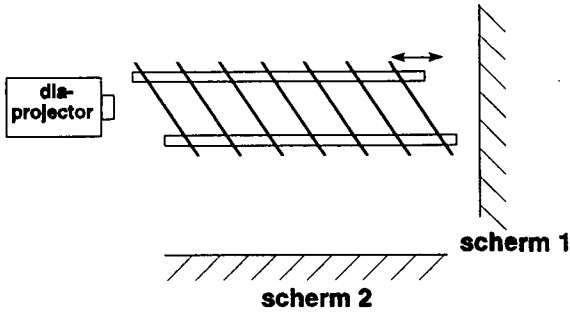
- Plaats nu voor een diaprojector een zwart glanzende kunststof of glazen plaat als spiegel (geen metaalspiegel, een verflaagje op een metalen plaat kan wel). In deze plaat 1 is de beeldprojector te zien, die vanuit de spiegelwereld de reële wereld in schijnt. Houdt men nu eenzelfde glanzende plaat 2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

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.

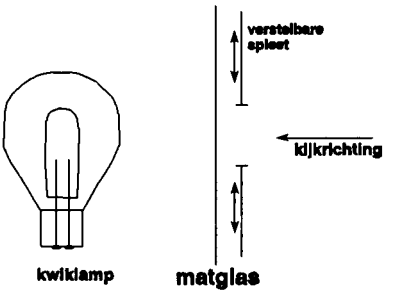
Een spiegeling onder de Brewsterhoek geeft nog geen waarnemingsmogelijkheden, maar de kwaliteit van het licht is al wel veranderd. Het heeft duisternis in zich, echter niet op de dynamische manier waarbij kleur ontstaat. Op een starre, gestructureerde wijze drukt de duisternis zijn stempel op het licht. 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.

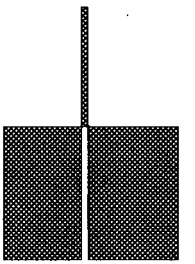
2.8 Spectroscopie

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/violette 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 lijnenspectrum 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 kleurenspectrum 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:

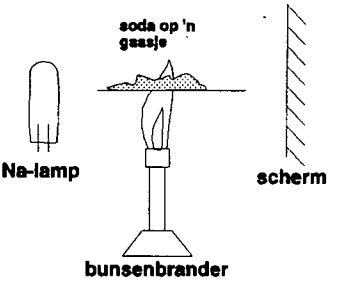


licht	geel	licht	magenta	licht	blauw	licht
	|		|		|	
donker	violet	donker	groen	donker	rood	donker

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 spectroscoop. 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 klasseproef 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

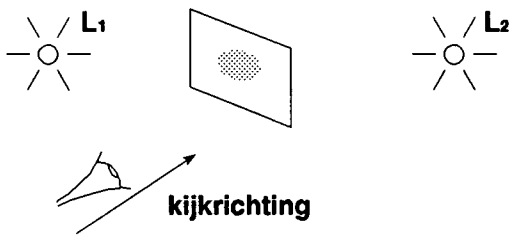
* Straatverlichtingslamp; afgeschreven lampen zijn veelal bij de gemeente, afdeling openbare verlichting, te verkrijgen.

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.

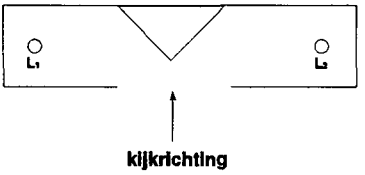
2.9 Lichtintensiteit

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 cm^2 (1 2/3 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:

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

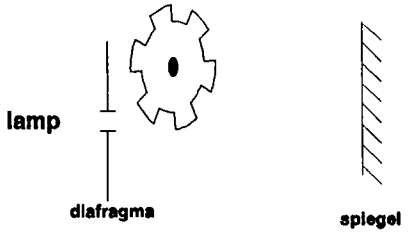
200 lux is de verlichtingssterkte voor ruimtes waar gewerkt wordt.

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 doorvallend 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.

3. KLEURENLEER

3.1 Inleiding

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

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

3.2 Hemelkleuren

3.2.1 Het begin van Goethe's kleuronderzoek

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

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

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

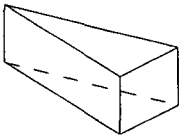
3.2.2 Troebele media

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

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

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

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



Voor sommige proeven is het nodig de troebelheid van de vloeistof te kunnen variëren. Hiervoor kan men een cuvet gebruiken met als grondvlak een langgerekte gelijkbenige driehoek. Houdt men een dergelijk cuvet gevuld met troebel water tegen het licht, dan ziet men van smal naar breed een kleurverloop wit-geel-oranje-rood. Houdt men het cuvet voor een raamkozijn, dan ziet men van smal naar breed een verloop violet-blauw-lichtblauw. Men kan zo'n cuvet ook door een dichtbij geplaatste diaprojector beschijnen. Van boven af gezien is er om de lichtbundel in het water licht- of donkerblauw te zien. Kijkt men in zo'n geval tegen de lichtbundel in, dan ziet men een gele respectievelijk rood gekleurde lichtbron.

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

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

3.2.3 De op- of ondergaande zon

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

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

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

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

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

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

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

licht	>	**duisternis**
uitbreidend		samenballend

geel **rood**

ontwikkeling:
stralend → fel, doordringend

3.2.4 De blauwe hemel

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

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

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

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

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

licht	>	**duisternis**
stralen		zuigen

lichtblauw **violet**

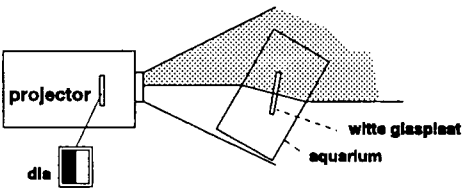
ontwikkeling:
zuigen → van binnenuit stralen

3.3 Prismatische kleur

3.3.1 Het ontstaan van prismatische kleur in samenhang met breking

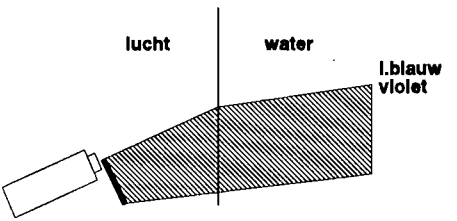
Prismatische kleur is een wezenlijk gecompliceerder fenomeen in vergelijking met de hiervoor behandelde hemelkleuren. Per klas zal men moeten bekijken welke elementen men aan bod laat komen.

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

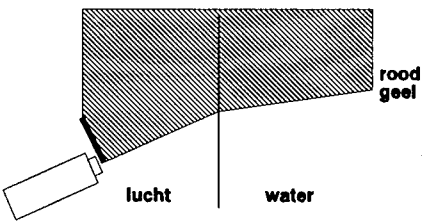


Achtereenvolgens onderzoeken we vier situaties, zie bijbehorende figuren.

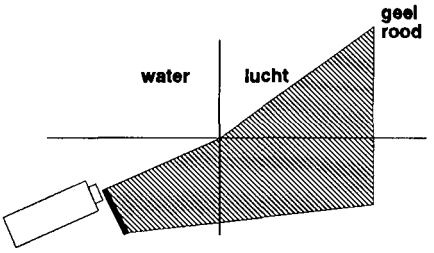
1. Overgang van lucht naar water.
   Bij de gekozen richting van de licht/donkergrens treedt een knik op zoals in de figuur. Er ontstaat een blauw/violette kleurrand met violet grenzend aan het duister.



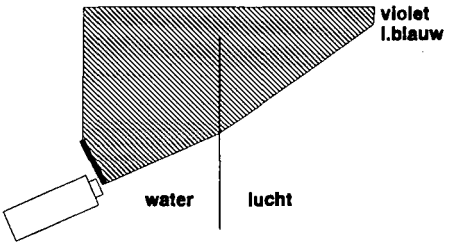
2. Als het karton aan de andere kant van de projector gehouden wordt, is de licht/donkergrens op dezelfde manier geknikt. Er ontstaat nu echter een rood/gele kleurrand, met het rood grenzend aan het duister.



3. Overgang van water naar lucht. (Men kan dit realiseren door de licht/donkergrens loodrecht op het waterprisma te laten vallen; er treedt dan namelijk bij de overgang van lucht naar water geen breking op).
Bij de gekozen richting van de licht/donkergrens treedt nu een knik op als in de figuur hieronder. Er ontstaat een geel/rode kleurrand met het rood grenzend aan het duister.

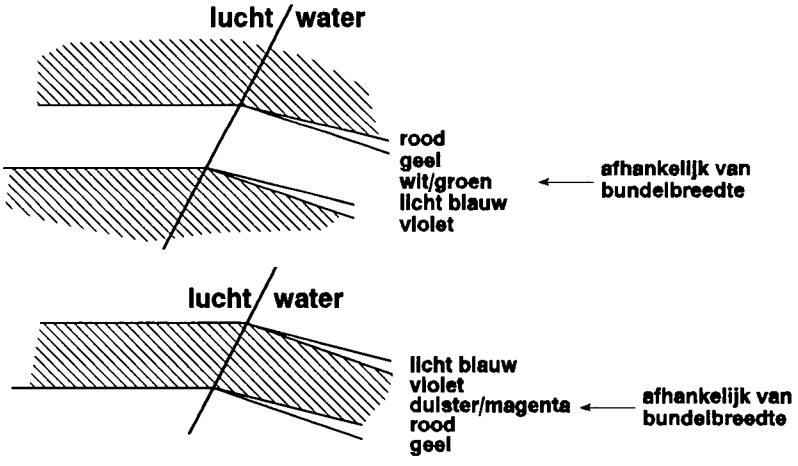


4. Als licht en duister weer verwisseld worden blijft de licht/donkergrens op dezelfde manier geknikt, maar de kleurrand is nu weer blauw/violet, met violet grenzend aan het duister.



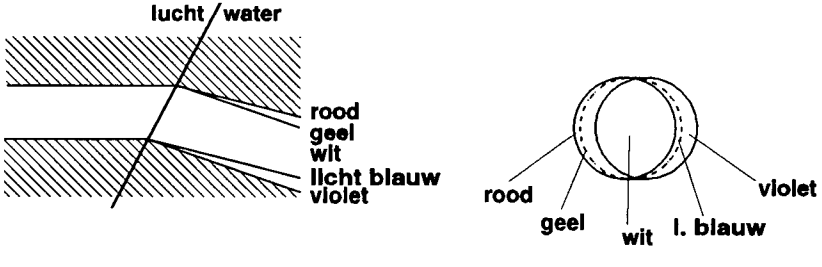
Vervolgens kan men twee licht/donkergrenzen gecombineerd laten breken. En wel zo, dat een bundel licht zich in een duistere ruimte bevindt, of andersom. In het eerste geval ontstaat het spectrum zoals dat door Newton beschreven en verklaard werd. Als de bundel smal is, ontstaat in het midden van het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

De eenvoudigste situatie waarin prismatische kleur ontstaat, blijkt te voldoen aan drie voorwaarden:
1. Er moet een overgang zijn tussen twee media van verschillende optische dichtheid.
2. Er moet een grens zijn tussen een lichtruimte en een duisternisruimte.
3. Deze grens moet schuin staan op het grensvlak tussen de beide media.

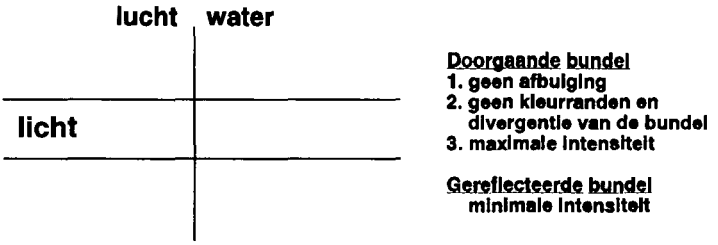


3.3.2 Optische dichtheid en duisterniswerking

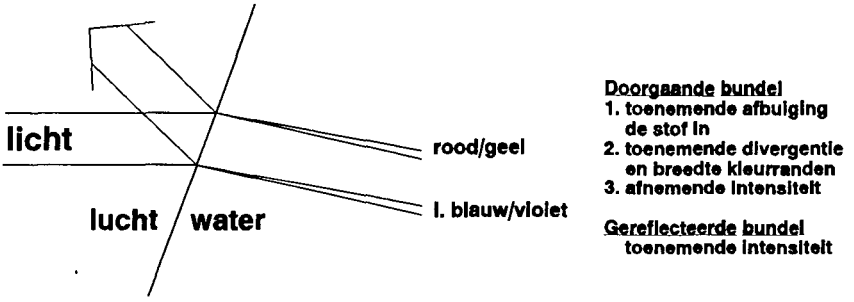
We kunnen nu deze basisvoorwaarden laten variëren en de effecten daarvan onderzoeken. De meeste invloed blijkt de hoek te hebben die de licht/donkergrens heeft ten opzichte van het grensvlak tussen de beide media. Hoe schuiner het licht invalt hoe breder de kleurbanden zijn. De hoek waaronder het licht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



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



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



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

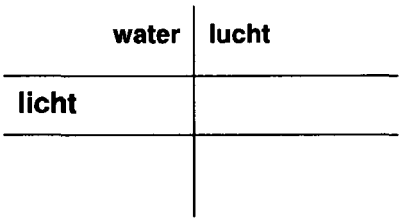
Beschouwen we deze verschijnselen in samenhang, dan worden we bij de overgang van een optisch dunner naar een optisch dichter medium de volgende twee tendensen gewaar:

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

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

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

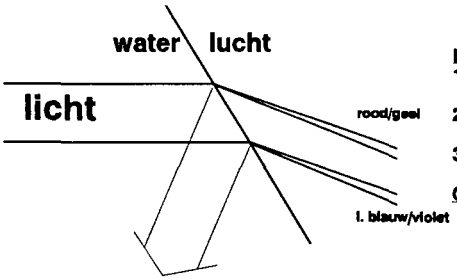
Op dezelfde wijze als in het voorgaande willen we ook de verschijnselen bij de overgang van een optisch dichter naar een optisch dunner medium beschouwen. Laten we een lichtbundel loodrecht op deze overgang invallen, dan vindt er ook hier geen breking plaats en vertoont de doorgaande bundel geen kleurranden.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



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

Gereflecteerde bundel
minimale intensiteit

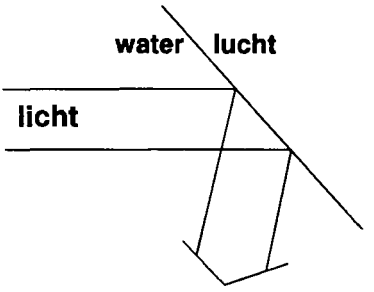
Naarmate de lichtbundel schuiner invalt is de breking sterker, waarbij het licht breekt naar het grensvlak van de media toe. Tegelijkertijd neemt de intensiteit van de doorgaande bundel af.



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

Gereflecteerde bundel
toenemende intensiteit

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



totale reflectie, geen doorgaande bundel

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

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

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

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

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

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

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

lichtwerking duisterniswerking

↑ ↓

← → → ←

↓ ↑

3.3.3 De dynamiek van de kleurranden

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

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

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

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

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

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

3.3.4 Kleur als wisselwerkingsresultaat van licht en duisternis

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

magenta
op weg naar de eenheid
synthese:
actief en passief

rood
actief,
bundeling tot
doordringings-
kracht

violet
passief,
opgezogen licht
doet duister van
binnenuit stralen

geel
eerste verdichting
doet het stralende
in verschijning
treden

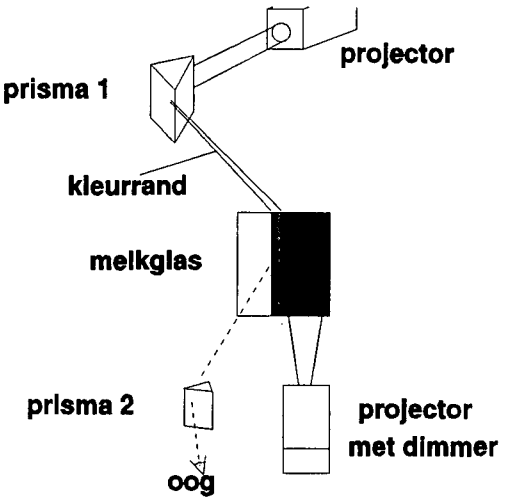
lichtblauw
licht wijkt tot
zuigend duister,
nog geen diepte

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

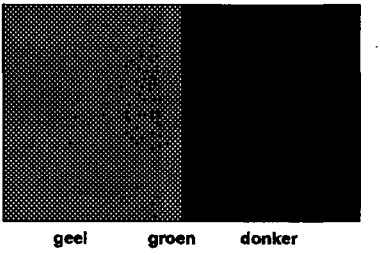
3.3.5 De ontwikkelingsmogelijkheden van prismatische kleur

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

Projecteer een geel /rode kleurrand van een gebroken lichtbundel op een melkglazen plaat. Op de achterzijde van de plaat is de helft van het melkglas verticaal afgeplakt met wit papier, dat in een verder verduisterde omgeving donker zal zijn. Naast het papier ziet men nu aan de achterzijde bijvoorbeeld het geel van de dóórschijnende geel/rode kleurrand. Op het papier projecteert men nu vanaf de achterzijde het ongekleurde licht van een diaprojector, waarvan de lichtsterkte met behulp van een dimmer kan worden geregeld. Hierdoor verschijnt naast de gele kleurrand duister, halfduister of licht, al naar gelang de instelling van de dimmer. Wederom van de achterzijde bekijkt men dit beeld door een prisma, waarbij het vlak van breking verticaal gehouden wordt en de breking naar rechts in de tekening plaats vindt (zie figuur).



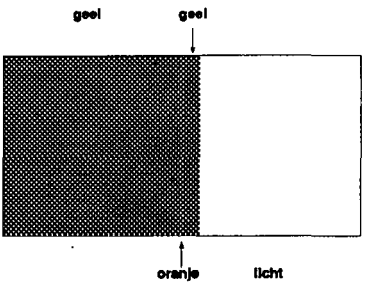
Heeft het papier naast de gele kleurrand een middelmatige lichtsterkte, dan ziet de gele kleurrand er door het prisma gezien niet anders uit dan zonder prisma. Is het papier naast de gele kleurrand echter donker, dan werkt de gele kleurrand als licht. Door het prisma gezien heeft het geel nu een groene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



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

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

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



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

3.3.6 De eenheid van het licht

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

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

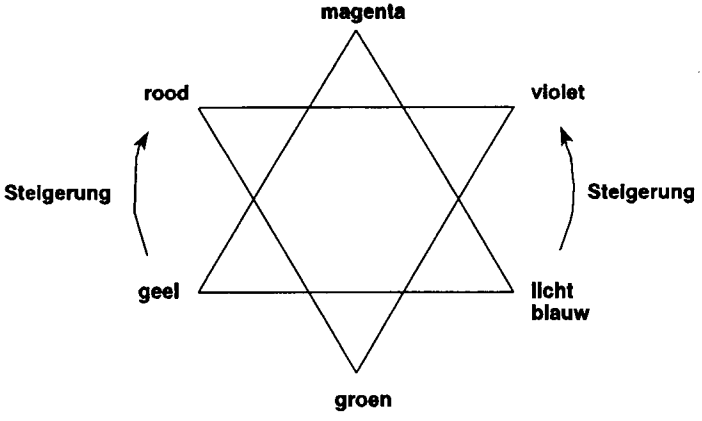
en donker; of deze grens zich nu vóór, ín of áchter de overgang tussen de media met verschillende optische dichtheid bevindt, is niet relevant!

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

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

3.4 Goethe's kleurencirkel

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



De tegenstelling tussen de donkere en de lichte kleuren

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

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

Additieve en subtractieve menging

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

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

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

Steigerung en culminatie

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

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

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

Complementaire kleuren

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

rood - groen - violet
blauw - magenta - geel

dynamiek: smal - breder - breed uitwaaierend

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

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

rood
het licht ondergaat verdichting, rood werkt op de ziel doordringend, op je af komend

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

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

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

groen	magenta
het licht is actief noch passief in wisselwerking met de duisternis, rustende, evenwichtige stemming	het licht is actief én passief in wisselwerking met de duisternis, tegengestelde zielestemming van zacht naast fel

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

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

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

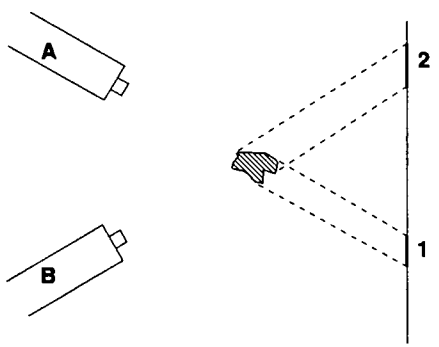
* Ruud van Renesse: *Bouw van een waterprisma.*

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

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

Aansluitend kan men de gekleurde schaduw behandelen.

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



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

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

Het ervaren van de kleurencirkel als een geheel

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

3.5 Newton en Goethe

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

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

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

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

4. ACHTERGRONDEN EN IDEEËNVORMING TEN BEHOEVE VAN DE DOCENT

4.1 Verruiming van de licht- en kleurenleer

Het huidige natuurwetenschappelijke denken heeft zich weloverwogen beperkingen opgelegd. Alleen de tastbare aspecten van de waarnemingswereld die gewogen en gemeten kunnen worden, tellen mee. Kwalitatieve aspecten worden niet meegenomen, terwijl de mens verscheidene zintuigen kent waarmee langs verschillende wegen kwaliteiten opgenomen kunnen worden. Zo is geluid, klank, taal en dergelijke niet alleen gestructureerde luchtvibratie, maar tevens beleving, gedachte en morele kwaliteit, bijvoorbeeld door de gevoelswaarde of intentie die onze woorden hebben. Door slechts één aspect van de werkelijkheid als reëel aanwezig te bestempelen wordt ons denken over die werkelijkheid eenzijdig. Daarmee ontwikkelde onze cultuur een niet te onderschatten blinde vlek.

Ook de methode dwingt, afgezien van de genoemde waarnemingsbeperkingen, de wetenschapper tot het accepteren of juist afwijzen van innerlijke activiteiten. Toegestaan is:

- De analytische methode, die zich beperkt tot kwantitatieve, ponderabele aspecten van de werkelijkheid.
- Het denken in uiterlijke oorzaak en uiterlijk gevolg. Dit wordt tot alles overheersende wet verheven. Zelfs in de chaostheorie, waar toeval een statistische waarschijnlijkheid is, wordt alleen met uiterlijke oorzaken gerekend.
- Het denken in termen van materie (atomair van opbouw) en energie (veelal gekwantificeerd). Aan alle verschijnselen worden deze begrippen ten grondslag gelegd.
- Het denken in ruimtelijke processen. Er kunnen alleen omzettingen plaatsvinden van wat al in de ruimte is.

De mens is een meervoudig wezen naar lichaam, ziel (voelend, gewaarwordend) en geest (denkend, ontwikkelend). Maar niet alleen bij de mens, ook in de wereld horen het innerlijk en uiterlijk bij elkaar. Een muziekstuk of een voordracht is zoals gezegd niet alleen vibratie in de lucht, maar tevens innerlijkheid die in de ruimte reëel aanwezig is en waar de luisteraar zich mee verbindt. Maar hetzelfde kan ook van kleur gezegd worden.

Bij alle waarnemingen zouden drie aspecten onderscheiden kunnen worden, het tastbare, het ziele-aspect (stemming, karakter) en het wezen

(geestelijke dimensie). Kijkt men bijvoorbeeld naar een rode theepot. De eerste verruiming ten opzichte van het gangbare denken is dan de waarneming van het rood reëel te nemen en niet als subjectieve projectie van de mens te beschouwen. Rood is iets voor *zich*. Het is geen golf, geen foton, het is rood.

De tweede verruiming houdt in dat men tracht vast te stellen wat de objectieve stemming is die met het rood is verbonden. Al heeft de mens ook subjectieve belevingen ten aanzien van rood, het rood heeft ook een objectieve gevoelswaarde, een reëel karakter. Van water wordt ook niet gedacht dat het alleen vloeibaar voor de mens is, het vloeibare wordt als een objectieve realiteit gezien. Op dezelfde manier als water vloeibaar is kan men van rood zeggen dat het een warme, energieke kleur is.

De derde verruiming houdt in dat men rood ook als een wezen beschouwt dat zich wil openbaren en zich in heel bepaalde omstandigheden kan ontwikkelen, zoals de groeiranden van sommige bladsoorten (jong hulstblad, kroonbladeren van de roos), de ondergaande zon, bloed en als aanloopkleur bij het gloeien. Dit gezichtspunt houdt in dat rood letterlijk kan ontstaan en vergaan, zoals een mens kan ontwaken en inslapen. Het komt in bepaalde omstandigheden tot verschijning met zijn stemming, tendens en activiteit. Maar het kan ook weer verdwijnen uit de ruimte en alleen als wezen existeren.

De mens is het wezen in de wereld dat het meest volledig tot ontplooiing is gekomen, met al zijn facetten, innerlijke en uiterlijke aspecten. Daarom zou men in het zoeken naar een veelzijdig kenproces ten aanzien van de natuur de mens als maat moeten nemen. Inzicht in de drieledigheid van de mens naar fysiek lichaam, ziel en geest helpt ons op weg om ons denken over de natuur op de drie geschetste wijzen, te verruimen: de reëel genomen waarneming, het karakter en het wezen.

Wanneer bij het kenproces alle aspecten worden betrokken, dan zal de synthese in bijvoorbeeld de techniek heel andere vormen kunnen aannemen. Bij de analyse zou dan niet alleen het minerale aspect, maar zouden alle zintuiglijke gewaarwordingen en ook de psychische en geestelijke dimensies betrokken moeten worden. Dan worden zowel de natuur als de mens ineens een stuk complexer, maar uiteindelijk begrijpelijker.

4.2 Licht- en duisternisruimte

Licht- en duisternisruimten zijn als zodanig niet zichtbaar. Of een ruimte doorlicht is of dat er in deze ruimte duisternis heerst nemen we, als er zich geen stoffelijkheid in deze ruimte bevindt, niet waar. Pas aan

ondoorzichtige, halfdoorzichtige of nevelige substanties wordt de wereld van licht en duisternis zichtbaar in een oneindig kleuren- en vormenspel. Om dit de leerlingen duidelijk te maken kan men een grasveld beschrijven dat deels baadt in het zonlicht en voor de rest in de schaduw ligt. Of men beschrijft de kleuren en vormen van bomen met hun bloesem, blaadjes en speelse beweeglijkheid op een zonnige dag in de wind. Zo wordt voor leerlingen inzichtelijk dat alleen aan de ontmoeting of confrontatie van de licht- en de dingwereld beide zichtbaar worden. Anders gezegd, licht en duisternis worden aan hun interactie zichtbaar.

Het is opvallend dat er voor duisternis meer woorden in het nederlands beschikbaar zijn dan voor licht. Het woord licht gebruikt men voor:

- Een vel wit papier.
- Vroeg in de ochtend is het al licht.
- De kosmos is licht.
- Licht met een hoofdletter, als men het hemelse of innerlijk licht bedoelt.
- Een engel of ander hiërarchisch wezen is licht.
- Het licht als begrip of idee.

Voor duisternis bestaan verschillende woorden, die ieder op de voor hen bestemde plek hun betekenis hebben:

- Donker wordt gebruikt om zwarte en matte, doffe dingen aan te duiden. Ook spreekt men van een donkere hoek en 's avonds in het donker lopen.
- Het woord duisternis of duister gebruikt men om innerlijke processen, onbekende dingen en negatieve wezens aan te duiden. Duisternis wordt meer gebruikt als begrip, donker gebruikt men om fenomenen te beschrijven.
- Tegenover licht kan men het aardse, de substantie, de materie plaatsen. Ook hier bestaan verschillende woorden om het verschil tussen fenomeen en begrip tot uitdrukking te brengen.

Blijft men in de beschrijving van de fenomenen steken, dan zal men nooit tot de begrippen licht, duisternis, lichtruimte en duisternisruimte kunnen komen. Men zal dan spreken over kleuren, over wit en zwart, over vormen, oppervlakken, transparantie en dergelijke, maar tot de evengoed reëel aanwezige begrippenwereld zal men dan niet doordringen. Om de begrippen lichtruimte en duisternisruimte met inzicht te kunnen hanteren zal men eerst met het denken in de fenomenen moeten doordringen. Wanneer men zich invoelend en denkend met de fenomenen verbindt, ziet men niet alleen het zonnige grasveld of de boom met zijn kleurige bloesems, maar beleeft men het zonbeschenen grasveld als juichend, vreugdevol en het gras in de schaduw als teruggetrokken in zich-

zelf, triest, afwachtend en verlaten. De lichtactiviteit maakt alles open, stralend. De dingen tonen hoe ze zijn, laten hun vorm, kleur en hun innerlijke activiteit zien. De duisternis maakt alles tastbaar, zwaar, gesloten en stemt tot verinnerlijking en overdenking. In het licht toont de wereld in beeld hoe zij in essentie is. De duisternis toont het gecontoureerde tastbare en leidt tot verdichting en verinnerlijking. Beeld- en tastwereld staan als een tweeheid tegenover elkaar, maar alleen aan elkaar worden zij tot fenomeen. Kijkt men naar de mens, dan is de beeldwereld meer verwant aan het innerlijk (fantasiebeeld, voorstellingsbeeld en denkbeeld). De tastwereld daarentegen is meer verwant met de uiterlijke, lichamelijke verschijning van de mens. Ook bij de mens leidt de samenwerking tussen de innerlijke en uiterlijke aspecten tot de verscheidenheid in processen.

4.2.1 Het karakter van de licht- en duisternisruimte

Aan de hand van de in paragraaf 1.4 beschreven proef zetten we de bespreking voort. Alleen bij de lamp/zon is er een proces, de rest verkeert in een toestand van licht/donker en kleurcontrasten. Proces en toestand zijn begrippen die in het deel over de 11e klas ten aanzien van de elektriciteit en het magnetisme reeds beschreven werden. Licht en duisternis zullen nu op een vergelijkbare manier onderzocht worden.

Bij een kaarsvlam is er een grote gasbeweging van onder naar boven. Het totale beeld van de vlam is echter strak en gevormd: men kan het opvatten als een uiting van het lichtende, dat naar een zijnstoestand streeft. De vlam als lichtend verschijnsel openbaart zich als geordende toestand in de beweeglijke, opstijgende, zich chemisch veranderende gasstroom. Net als warmte is licht als toestand echter *dynamisch*. Het ontstaat en kan ook ieder moment weer uit de ruimte verdwijnen als het proces stopt. Het licht heeft zijn centrum en aangrijpingspunt in de vlam, maar wil de hele ruimte omvatten en brengt deze in een andere kwalitatieve toestand. Het wordt een eigenschap van de ruimte zelf dat deze lichtend is. In een lichtruimte kunnen licht en ruimte net zo min van elkaar gescheiden worden als koper en de kleur van koper. De lichtruimte is een kwalitatieve toestand van de ruimte, die nog geen met de zintuigen waarneembaar fysiek aspect in zich draagt. De lichtruimte heeft zijn centrum in de lamp of de kaars, maar komt daar niet vandaan. De oorsprong van de lichtruimte is onruimtelijk, hij komt alleen aan een fysiek proces van de gloeidraad of het verbrandende gas tot verschijning.

Men kan dit heel goed vergelijken met de mens. Het innerlijk van de mens komt ook niet uit het lichaam voort, maar de lichaamsprocessen

zijn wel het incarnatiepunt waaraan zich het innerlijk vanuit het onruimtelijke kan manifesteren. Ook het innerlijk geeft aan de ruimte een nieuwe kwaliteit wanneer deze bezield wordt. Dit bezield zijn houdt wederom geen vulling van de ruimte in, maar een kwalitatieve verandering ervan. Ook licht vult de ruimte niet, zoals water een fles, maar brengt een kwalitatieve verandering van de ruimte teweeg. Gangbaar is te denken dat alles al verborgen, of energetisch gebonden aan de stof aanwezig is. Maar dit is reeds een oud paradigma. Een nieuw gezichtspunt zou kunnen worden gevonden door uit te gaan van meervoudige, van elkaar onafhankelijke systemen, die samenwerken: leven, bezieling, licht, warmte, substantie, en dergelijke. Ten aanzien van de lichtruimte kunnen we concluderen dat deze actief en openend is. Hij brengt glans, kleur, groei, vreugde, aandacht en contact voort en verbindt alles met elkaar.

We zullen nu de duisternisruimte trachten te karakteriseren. Een donkere ruimte ontstaat door koude, ondoorzichtige stoffen. Bij nacht is de kosmos als lichtruimte niet zichtbaar, zolang er geen objecten zijn die kunnen oplichten. Maar de nacht is tevens een duisternisruimte die door de ondoorzichtige aarde teweeg wordt gebracht. Ook deze duisternisruimte kunnen we niet zien. Alleen aan objecten in een licht- of duisternisruimte kunnen we het licht of de duisternis waarnemen. Een duisternisruimte is passief, omhullend en afsluitend. Alles lijkt kleiner, dat wil zeggen een duister object is als beeld reëel compacter en meer verdicht dan een lichtend object. De taalwijsheid spreekt ook van "de avond *valt*" en "de duisternis *lag* over de wateren". Hieruit spreekt de passiviteit van de duisternisruimte.

Elk voorwerp vertegenwoordigt, afgezien van het feit dat het in een lichtruimte ook kan oplichten, de duisterniswerking. Hierbij kunnen we drie aspecten onderscheiden:

1. De omgeving voor zover deze passieve duisternisruimte is.
2. Het oppervlak waar breking, spiegeling, polarisatie en dergelijke plaatsvinden.
3. Het inwendige. Hier treedt beeldheffing op bij transparante stoffen. Ondoorzichtige stoffen zijn inwendig helemaal duisternisruimte.

Men ziet hier een grote tegenstelling tussen het inwendige en de omgeving van het voorwerp. Het inwendige is bij ondoorzichtige stoffen zoals metalen volledig in zichzelf gesloten en niet interactief. De omgeving als duisternisruimte is ook passief en niet interactief, maar de werking van de duisternisruimte is wel inzuigend ten opzichte van het licht. Het meest interactief is het oppervlak van het voorwerp, waar de licht- en duisternisruimte op veel verschillende manieren op elkaar inwerken. Veel licht- en kleurfenomenen hebben met het oppervlak te maken. Een grens maakt

blijkbaar de ontmoeting tussen licht- en duisternissfeer mogelijk. Daarbij werkt de duisternis meer van binnenuit de stof en het licht meer van buitenaf.

In het groot gezien is de ruimte van het heelal door en door licht en vertegenwoordigen de planeten, de manen en de aarde met al zijn gesteenten, planten, dieren en mensen de duistere dingen. En al zijn veel voorwerpen als gassen, vloeistoffen en kristallen transparant, toch vertegenwoordigen zij de duisterniswerking in fenomenen als breking en heffing. In alle besproken fenomenen openbaart zich een omvattende polariteit:

licht	↔	*duisternis*
licht	↔	*stof*
ruimte	↔	*ding*
beeld	↔	*tast*

4.2.2 Vier aspecten van de licht/duisternisruimte

We zullen nu het karakter van de licht- en duisternisruimte nader omschrijven door onderscheid te maken tussen vier aspecten die hiertoe adequaat zijn gebleken, namelijk drager, ruimte, structuur en tendens.

1. Drager

De lichtruimte

De zon, gloeiende voorwerpen en gas in een ijle elektrische toestand zijn het meest typerend als dragers van de lichtruimte. In tweede instantie zijn alle *dingen* dragers van een lichtruimte, omdat ze oplichten en daardoor hun eigen lichtruimte creëren.
De primaire dragers zijn als specifieke objecten nauwelijks te zien. De specifieke stofeigenschappen gaan verloren in een plasmatoestand zoals die voor de zon beschreven wordt. Ook gloeiende voorwerpen verliezen

De duisternisruimte

De aarde, maan en alle ondoorzichtige stoffen zoals stenen, vloeistoffen, maar ook een ondoorzichtige gasvlam, zijn primaire dragers van de duisternis. De meeste gassen en vloeistoffen zijn transparant. Zij zijn ondanks het feit dat ze stoffelijk zijn nog heel lichtverwant.
Heel veel vaste stoffen zijn ondoorzichtig. Zij zijn de typische dragers voor de duisternisruimte om zich heen. Veel vaste stoffen zijn alleen door hun oppervlaktegesteldheid, troebel-

hun specifieke karakter. Alle stoffen gloeien op dezelfde manier, die alleen nog afhankelijk is van de temperatuur. Typerend is wel dat ondoorzichtige en vooral zwarte stoffen de sterkste uitstraling hebben als secundaire dragers. In dit geval gaan het licht- en duisternisaspect samen. Een ander aspect van gloeien vindt men bij de gloeidraad, waar men altijd het probleem heeft hoelang de gloeidraad zijn vorm kan behouden bij een zo hoog mogelijke temperatuur. In gasbuizen is heel weinig stof en moet de begrenzing door de gasbuis aangebracht worden.

heid of insluitsels ondoorzichtig, zoals kristallen, vezels en kunststoffen (pvc is transparant maar door vulstoffen vaak grijs). Glaspoeder is ondoorzichtig wit.

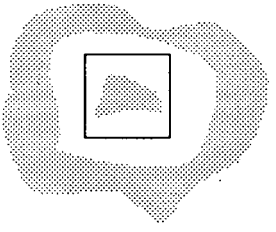
De primaire lichtdragers tenderen naar niet specifieke stofeigenschappen, zijn meestal warm en neigen naar het onbegrensde.

De duisternisdragers hebben specifieke stofeigenschappen, zijn veelal koud en begrensd.

2. Ruimte

Zowel de licht- als de duisternisruimte heeft een grens nodig om aan te ontstaan:

De lichtruimte van een gloeiende doos is zowel in als om deze doos.



De donkere ruimte van een doos hangt direct samen met de ondoorzichtigheid ervan. Zowel in als om de doos is een donkere ruimte.

De donkere ruimte is collectief voor alle dingen. Het wordt namelijk niet donkerder wanneer er in een donkere ruimte meer dingen gelegd worden. In die zin is het begrip donkere ruimte verwant aan het begrip materie, dat voor alle substanties gebruikt

De doos is echter de grens waar de lichtruimte zich actualiseert. De lichtruimte is constant in een dynamisch proces van ontstaan en vergaan. Ieder lichtend ding geeft een bijdrage aan de lichtruimte.

Licht kan getypeerd worden als een ongedifferentieerde volheid die zich specifiek actualiseert in zijn verschijning aan de stof.

wordt. De duisternis is een eigenschap van dingen die niet specifiek is voor objecten.
Duisternis kan men typeren als een collectieve onbestemdheid, die om de dingen als een passieve, geworden toestand hangt.

De duisternisruimte omhult de dingen, het is als een vulling, als een drukkende last, die letterlijk verlicht kan worden.

Gas, water en transparante vaste stoffen brengen ook in lichte mate een licht- en een duisternisruimte voort. Ze lichten namelijk op in een lichtruimte, zoals bijvoorbeeld de blauwe lucht met name aan de horizon, maar vertegenwoordigen tegelijkertijd duisternisruimte, wat men bijvoorbeeld bij de zon ziet die steeds donkerder van kleur wordt, naarmate hij lager aan de horizon staat.

Ontstaat in een gasbuis het licht ook aan een grens? Om deze vraag te beantwoorden betrekken we hierbij de beschouwingen van de elektriciteit en het magnetisme. Het gas bevindt zich in een gasbuis in een zeer ijle toestand en is een volume zonder grens. De uitbreidende, op het oneindige gerichte tendens van het gas werkt in drie dimensionale richtingen. Vanuit dit gezichtspunt zullen we de karakteristiek van het gas driedimensionaal noemen. Het oppervlak van een vloeistof zoals water heeft een tweedimensionale karakteristiek. Vaste stoffen zijn wel ruimtelijk, maar hun karakteristiek is ééndimensionaal. Dit komt tot uitdrukking in het feit dat ze afmetingen hebben. Het elektrisch/magnetische kringproces in een gasbuis verlaagt de dimensionale karakteristiek van het gas, zijn ruimtelijk karakter gaat verloren. Deze dimensionale contractie heeft volgens de wet van proces en tegenproces in de bovennatuur een tegenproces tot gevolg.

lichtend gas
↑
gas - driedimensionaal
↓
elektrisch/magnetische proces

Gas vertegenwoordigt in hoge mate een toestand van eenheid. Met deze eenheid zijn aspecten als de warmtesfeer, de lichtsfeer, de stof en derge-

lijke intrinsiek verbonden. Het ruimtelijke aspect van het gas gaat nu door toedoen van het elektrisch/magnetische proces verloren. Het gas verliest daarmee zijn intrinsieke lichtnatuur die met het ruimtelijke samenhangt. Wat nu niet meer innerlijk, in de sferenwereld verbonden is, wordt veruiterlijkt.

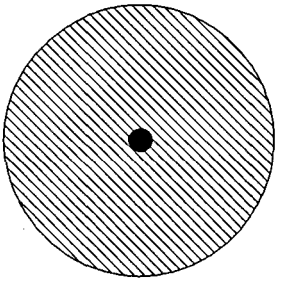
3. Structuur

Een lichtruimte ontstaat altijd aan ondoorzichtige grenzen. Wat is nu het verschil tussen de lichtruimte om de grens, buiten de stof en binnen de grens, in de stof? Daar licht en duisternis niet afzonderlijk waargenomen kunnen worden, zullen hier een drietal situaties beschreven worden waarin we het licht- en duisternisaspect kunnen onderscheiden.

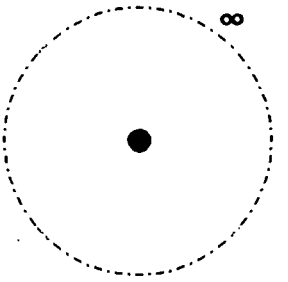
1. Een grijsbewolkte hemel. Alles is lichtend, er zijn geen schaduwen. De zon is niet te zien. Er is alleen indirect licht en dat is overal. Het licht lijkt passief, alzijdig, richtingloos, als een volume, als ruimte aanwezig te zijn. Alles is openlijk aanwezig, naast elkaar, maar toch verbonden. Licht schept ruimte, verbindt alles met elkaar op een gelijkwaardige wijze. In een beeld samengevat zou men het licht als volgt kunnen weergeven:

Ook voor de duisternisruimte geldt dat deze aan ondoorzichtige grenzen tot stand komt. Ook hier volgen een drietal voorbeelden.

1. De donkere ruimte in een geluidsgedempte grot. Men beleeft lichamelijk en gevoelsmatig zichzelf en zoekt tevens al luisterend de omgeving af. De ruimte lijkt als het ware gevuld. De duisternis hangt, ligt als een deken, drukt, bédrukt en beangstigt soms. Men beleeft heel duidelijk dat alleen het bewustzijn de verbinding tussen de objecten in de omgeving, die men eventueel kan betasten, tot stand kan brengen. In beeld weergegeven:



Licht brengt samenhang en ruimte. Men voelt zich er door opgenomen in het geheel.



Duisternis werpt je lichamelijk en psychisch terug op jezelf. Tegelijkertijd is een grenzeloze oneindigheid aanwezig. Centrum en oneindigheid vallen uit elkaar.

Licht en duisternis zijn beide vrijwel structuurloos. Licht is ruimte en duisternis is isolement ten opzichte van de oneindigheid. Licht en duisternis vertegenwoordigen beide een toestand zonder lijnstructuur of richting. Voor licht is de structuur het alzijdige volume, voor duisternis de tegenstelling punt-oneindigheid. Licht- en duisternisvelden zijn ruimtetoestanden, waarbij het licht openheid en samenhang geeft en de duisternis bedrukt en gevuld isolement.

2. Bedekt men een groot lichtend vlak gedeeltelijk met dof zwart papier, dan wordt het vlak steeds stralender. In de ruimte er omheen ontstaan steeds duidelijkere, kleinere en scherpere schaduwen, die van het vlak af gericht zijn. Een lichtruimte wordt stralend wanneer de lichtbron kleiner wordt. Door duisternis, door omhulling met ondoorzichtige dingen krijgt het licht een stralend karakter. Door verduistering komt het dynamische karakter van het licht als straling tot verschijning. Bijvoorbeeld:

2. Een heldere, winterse, maanloze nacht, ver weg van stadslicht. Hier wordt de wijdsheid en diepte van de duisternis geactualiseerd. De diepte en wijdsheid van de duisternis komt ook tot uitdrukking in de hemelkleuren blauw, violet en indigo. De oneindigheid wordt als onpeilbare diepte waarneembaar en beleefbaar.

- De zon schijnt door de wolken in een heiige lucht. Men ziet prachtige lichtzuilen.
- De zon schijnt op een verchroomde kraan. Een sprankelend licht verschijnt.
- Tussen de donkere wolken ontstaat een open plek, waar de stralend blauwe hemel zichtbaar is.
- De zon zelf is heel strak begrensd en daardoor heel stralend.

Door begrenzing en verduistering ontstaat het stralende karakter van licht.

Door lichtpunten (sterren), lichtlijnen (vallende sterren) en lichtvlakken (maan, hoge wolken, poollicht) ontstaat diepte in de oneindigheid van de duisternis.

3. Wat is de structuur en het karakter van de lichtruimte in bijvoorbeeld een gloeiende bol metaal?

3. Wat is de structuur van de duisternisruimte in bijvoorbeeld een prisma of een bak water?

Ondoorzichtige stof waar de lichtnatuur sterk ín werkt.

Transparante stof waarin de duisternis actief is.

De stof komt door verhitting in een toestand waardoor de stofeigenschappen makkelijk veranderen en bij zeer hoge temperaturen zelfs transformatie van elementen kan plaatsvinden (fusie). Zolang een voorwerp alleen gloeit heeft het spectroscopisch gezien een continu spectrum. Zodra stofveranderingen optreden, ontstaan typische kleurlijnen in het spectrum. Wanneer er een stofdamp rond het gloeiende voorwerp hangt, krijgt men donkere lijnen in het spectrum (bij-

De werking en structuur van de duisternis ontdekt men aan het licht en vice versa. Kijkt men door een diep glas gevuld met water naar de bodem ervan, dan lijkt dit glas veel minder diep dan zonder water. Kijkt men door een heiige lucht naar een reeks bergcontouren, dan lijken deze bergkammen minder ver weg dan wanneer men door heldere lucht kijkt.
Transparante stoffen werken door de duisterniswerking die zij vertegenwoordigen verdichtend

voorbeeld het zonnespectrum). Men zou kunnen zeggen dat een gloeiend voorwerp neigt naar een zonnespectrum, waarbij volgens Rudolf Steiner de zon als een volledig ontmaterialiseerde, negatieve materietoestand moet worden gezien. De stoffelijkheid is ín de zon volledig opgeheven, maar óm de zon werken de zonnegassen modificerend op het continue spectrum in.
Kijkt men naar een gloeiend voorwerp in een donkere ruimte, bijvoorbeeld een kampvuur in de nacht, dan krijgt men de indruk van een van binnenuit komende verinnerlijking. Men kijkt als het ware in een wereld achter de gewone wereld, een soort embryonale toestand, die bruisend, vol leven en beweging is.

op de licht- en beeldruimte. Kijkt men schuin in een aquarium, dan is de diepte loodrecht op de wand waar men door kijkt nog verder gecomprimeerd. De fenomenen breking en heffing zijn twee aspecten van hetzelfde verschijnsel. Beide tonen ze de verdichtende, inzuigende duisterniswerking loodrecht op de grens van de stof.

De structuur van de lichtruimte in een stof is dynamisch chaotisch. Het is een ongevormde potentiële toestand.

De structuur van de duisternis in een stof is loodrecht naar binnen toe inzuigend en verdichtend.

4. Tendens

Onder tendens zal hier worden verstaan de richting waarin een licht- of duisternisruimte zich ontwikkelt. Beide verkeren in een toestand. De vraag is hoe deze toestand ontstaat en vergaat en welke tendens daarbij tot uitdrukking komt.

Bij de primaire lichtruimte zoals de zon vindt men een beweeglijke, chaotische dynamiek aan de oppervlakte. De lichtruimte vertegenwoordigt een proces dat steeds maar door blijft gaan. Het

Een duisternisruimte ontstaat aan stoffelijk dingen en is verwant met rust en onveranderlijkheid in de vaste vorm. De duisternisruimte kan als statische toestand getypeerd worden. Hij heeft

is een dynamische toestand, die aanstekelijk werkt op alle dingen, die immers mee oplichten in het lichtveld. Het is een schenkende, openende ruimtetoestand.
De lichttoestand is de normale toestand van de kosmische ruimte.

De tendens van het licht is er te zijn, echter op een dynamische, schenkende manier. Het licht is wordend en steeds actueel in een "nu"-toestand.

geen centrum, zoals een lichtbron in een lichtruimte. Duisternis is een bijzondere toestand. Hij brengt afzondering, maar ook verinnerlijking.

De tendens van de duisternisruimte is passief, statisch te zijn, als een geworden toestand. Tevens verhult hij in deze verleden-tijd-toestand potentiële, toekomstige verschijningsvormen in een verinnerlijkte toestand. Het beeld punt-oneindigheid toont in het punt de geïsoleerde, statische tendens en in het oneindigheidsaspect de tendens tot verinnerlijking.

4.3 Beeld- en tastnatuur

De tastzin en het oog vertegenwoordigen als polaire zintuigen de tweevoudige natuur van de mens. G. Berkeley wees hier in 1719 voor het eerst op. Rudolf Steiner maakte de leerkrachten van de eerste Vrije School in Stuttgart op deze kwestie attent. Met het oog als zintuig leeft de mens in een beeldwereld en via de met de huid verbonden tastzin staat hij in contact met de dingen om ons heen. Eén tegenstelling dringt zich daarbij gelijk op, namelijk dat we de beeldwereld tot ons nemen door afstand te houden, terwijl het tasten een direct contact maken met de wereld van de dingen inhoudt. Normaal gesproken vallen deze polaire werelden in de mens samen. De polaire zintuiglijke ervaringen worden geïntegreerd, zodat wij de wereld als een eenheid ervaren. Haalt men deze twee ervaringswerelden tijdelijk uit elkaar, bijvoorbeeld door middel van een prisma- of omkeerbril, dan valt de beeldervaring niet meer samen met die van het tasten. De randkleuren, beeldverplaatsing en omkering verdwijnen na verloop van tijd, wanneer men zich flink verkennend, tastend met de omgeving verbindt. Bij mensen die veel minder in staat

zijn om de wereld fysiek te benaderen, zoals invaliden, duurt de aanpassing veel langer. Ook bij mensen die langdurig blind zijn geweest moet de integratie van de beeld- en tastervaring zorgvuldig begeleid worden, willen zij niet psychisch ontwricht raken.

De onafhankelijkheid van de beeld- en tastervaring, die normaal geïntegreerd zijn, wordt men ook gewaar wanneer men in een zwembad iets wil pakken dat zich onder water bevindt. De tastwerkelijkheid is dan niet in overeenstemming met de beeldverschuiving. Door ervaring is afstemming mogelijk. Ook de dieptegewaarwording van een bergvergezicht hangt sterk af van de vochtigheidsgraad van de lucht. Voor een piloot lijkt de hemel aan de polen, waar de lucht helder en droog is, veel wijdser dan in de vochtige ochtendlucht van de Alpen. Een verrassende ervaring is ook om tegen een door een aquariumbak vallende lichtbundel in te kijken. Men heeft het gevoel recht vooruit te kijken, maar kijkt men even boven op het aquarium dan bemerkt men dat de bundel twee maal knikt en evenwijdig verplaatst uit de bak treedt. Een overeenkomstige innerlijke ervaring treedt op als een denkproces, dat glashelder en rechtlijnig lijkt te verlopen, vol knikken blijkt te zijn wanneer men er 'dwars op kijkt'.

De bespreking van de beeld- en de tastwaarneming vormt een mooie introductie voor een gesprek over de innerlijke en de fysieke mens, waar ook twee onafhankelijke realiteiten streven naar een organische samenhang.

4.4 Fenomeen, veld en sfeer

Gaat men invoelend en denkend op de fenomenen in, dan kan men uiteindelijk doordringen in het gebied van de zuivere, pure gedachten. Deze kunnen geheel losstaan van de waarnemingen, maar er ook ten nauwste mee verbonden zijn, terwijl men toch in het zuivere denken blijft. Plato sprak in dat verband van de eeuwige ideeën en Aristoteles van het wezen in de verschijning. Leibniz (1646-1716) beschouwde deze gedachten als realiteiten en noemde zo'n gedachte een monade. Begrippen zijn net als waarnemingen reëel, zij komen alleen niet via de zintuigen tot de mens, maar via het denken. Het denken vormt de innerlijke verbinding met de wereld, zoals de zintuigen de fysieke brug met de wereld vertegenwoordigen.

Tussen de zuivere waarneming en de gedachte staat het veldbegrip. Een licht- of duisternisruimte of -veld is geen zuivere waarneming, maar ook geen zuiver begrip, het is de verbinding van beide. Men denkt het veldbegrip in de ruimte alsof het een waarneming is. De kleur- en licht/-

donkerfenomenen appelleren sterk aan de wens het zuivere denken te willen bereiken. Dit wordt bevestigd door de geschiedenis: op het terrein van de lichtverschijnselen werd het eerste gezocht naar het wezen van het verschijnsel. Op overeenkomstige wijze als bij de elektriciteit en het magnetisme zullen we nu fenomeen, veld en sfeer benoemen ten aanzien van de licht- en duisternisfenomenen:

fenomeen	*veld*	*sfeer*
Door middel van waarnemen en denken worden de fenomenen geordend.	*Het veldbegrip verbindt de afzonderlijke waarnemingen die voortkomen uit een bepaalde werkzaamheid in de ruimte.*	*Het idee sfeer verbindt alle fenomenen met elkaar door middel van het zuivere denken.*
-Kleur,vorm,licht/ donker en beeldfenomenen. -Natuurlijke en experimentele, kwalitatieve en kwantitatieve fenomenen. -Exacte beschrijving van zintuiglijke en belevende waarnemingen.	-Een begrip wordt als het ware tot waarneming. -Het begrip lichtruimte of -veld heeft tot gevolg dat men denkend in de waarnemingswereld is.	-Licht en duisternis als zuivere begrippen hebben een onruimtelijk karakter, maar zijn wel realiteiten. -De "oneindigheid" is als sfeer of combinatie van sferen overal in de ruimte als intrinsieke werkelijkheid aanwezig.

Het begrip sfeer is nieuw en vraagt om een nadere typering. Heeft men al denkende de waarnemingswereld zover doorgrond dat men tot een zuiver begrip of monade komt, dan is men doorgedrongen tot één innerlijk of wezensaspect van de verschijnselenwereld. Zo dringt men, wanneer men het denkproces logisch, eerlijk en gecontroleerd doorloopt, steeds dieper in het innerlijk van de wereld door.

Vergelijkt men dit met de mens, dan is ook daar de zintuiglijke waarneming ruimtelijk-tastbaar of als beeld gegeven. Het innerlijk is, ook bij zelfbeschouwing, moeilijker te vatten. Alleen al de vraag waar het innerlijk zich bevindt, stelt ons voor grote problemen. Het is ten dele ruimtelijk en ten dele onruimtelijk werkzaam. Het innerlijk en het lichaam hangen volledig samen, maar zijn toch als monaden van elkaar te onderscheiden. Ze komen niet uit elkaar voort, maar komen wel aan elkaar tot ontplooiing.

Zoals van het innerlijk maar een klein deel beleefbaar en het grootste deel potentieel dynamisch aanwezig is, zo zijn de licht- en de duisternissfeer zowel gemanifesteerde als ongemanifesteerde intrinsieke werkelijkheden, die overal werkzaam kunnen worden maar niet ruimtelijk zijn. Net als ons eigen innerlijk doorgronden wij ze denkend. Het innerlijk van de mens kent evenals de licht/duisternissfeer vele hogere en lagere niveaus. Het is niet alleen een hoog en ongedifferentieerd idee, zoals het hogere ik van de mens, ook de interacties tussen de licht- en duisternissfeer behoren tot beide sferen. Plaatst men bijvoorbeeld een prisma in een lichtruimte, dan treedt een interactie van de licht- en duisternissfeer op, die zich aan de licht/donkergrenzen aftekent als kleurranden. Plaatst men in de licht/donkerruimte een ondoorzichtig voorwerp, dan krijgen de schaduwranden kleur.

4.5 Absorptie, radiatie, spiegeling en verstrooiing

Hier zal een poging ondernomen worden om de verworven begrippen spiegeling, radiatie en dergelijke op fenomenologische wijze in verband met elkaar te brengen.

Kijkt men op een zonnige dag om zich heen, dan is alles zichtbaar als lichtende objecten. De stenen, planten, dieren en mensen tonen hun kleur en vorm. In een lichtruimte tonen de dingen hun licht- of beeldnatuur. Een object heeft een meervoudige natuur, namelijk een stof- of tastnatuur en een licht- of beeldnatuur. Het is geen waarneming dat licht geabsorbeerd wordt of dat bepaalde kleuren wel en andere niet weerkaatst worden. Puur vanuit de fenomenen beschreven is het zo, dat in een lichtruimte van een blauwe lamp het onderscheid tussen witte en blauwe voorwerpen verloren gaat en rode voorwerpen zwart lijken. In een eenzijdige lichtruimte kunnen de dingen zich niet in hun volledige eigen lichtnatuur laten zien, maar alleen op een eenzijdige manier.

Plaatst men een voorwerp in een lichtruimte, dan laat het voorwerp niet alleen zijn kleur en vorm zien, maar tevens wordt het warm en creëert het een lichtruimte met een eigen kwaliteit om zich heen (bij spiegeling de oorspronkelijke kwaliteit van de lichtruimte). Verbindt men deze fenomenen met de vier evolutiefasen, zoals die door Rudolf Steiner zijn beschreven (zie deel I, hoofdstuk 4.9.4), dan valt op dat een meelichtend voorwerp alle vier de evolutiefasen laat zien:

fase I	- warmte	- absorptie
fase II	- lichtruimte en eigen kleur	- radiatie
fase III	- spiegeling	- spiegeling
fase IV	- eigen vorm	- verstrooiing

Door *absorptie* ontstaat warmte, dat wil zeggen dat het individuele, specifieke karakter van het verschijnsel er toe neigt verloren te gaan. De anorganische warmte vereffent alle verschillen. Onder absorptie kan dus worden verstaan het wegzuigen van een veldtoestand, de lichtruimte, opdat vereffening kan plaatsvinden.

Onder *radiatie* kan men verstaan, het in stand houden van een veldtoestand, de lichtruimte. Het licht stroomt dus niet weg van een punt naar de omgeving, maar de lichttoestand of lichtruimte wordt in stand gehouden.

Onder *spiegeling* van bijvoorbeeld de zon in een weerkaatsend voorwerp kan men verstaan, dat het lichtbeeld van binnen uit het voorwerp - als een beeldzon - een nieuwe lichtruimte creëert. Het is dus geen weerkaatsing in mechanistische zin.

Verstrooiing is geen uiteenvallen van licht, maar een oplichten, lichtend worden van de substantie. Het is een interactie van toestanden - de lichtruimte en de substantie - die samenwerkend een lichtruimte creëren van een specifieke kwaliteit.

4.6 Geschiedenis van het licht- en kleuronderzoek

Dit omvangrijke thema wordt hier slechts op enkele karakteristieke punten aangestipt. Zie voor een boeiende gedetailleerde beschrijving het eerder genoemde boek van Arthur Zajonc *Het licht zien*.

Zoals alle wetenschap begint het beschrijven van lichtfenomenen bij de Grieken. Het oog en het object - dachten de Grieken - zijn beide actief bij het kijken. Van het oog gaat - geleid door de mens - een fijn soort innerlijk licht uit, dat het veel grovere, uiterlijke licht van het object ontmoet. In de ontmoeting van het innerlijke en uiterlijke licht ontstaat de beeldwaarneming. Tot de elfde eeuw blijft deze gedachte in verschillende modificaties bestaan. Daarna doet de gedachte opgang dat het uiterlijke licht een secundair effect is van het goddelijke licht, dat de hele kosmos in zich draagt. Het uiterlijke licht dringt het oog binnen, dat alleen actief is in zichzelf.

In de 17e eeuw doet de analytische behandeling van lichtverschijnselen zijn intrede. Huygens (1629-1695) introduceert de golftheorie, Newton (1643-1727) de corpusculaire theorie. In beide worden de kleurkwaliteiten gemechaniseerd en tot eigenschappen van golven of deeltjes gereduceerd. Golfopvatting en deeltjesopvatting blijven lange tijd met elkaar concurreren, met wisselend succes. De eerste krijgt steun als Maxwell (1831-1879) het licht weet te integreren in zijn wiskundige beschrijving van elektromagnetische verschijnselen, maar de introductie

van het foton door Planck (1858-1947) versterkt weer het deeltjeskarakter van het licht. Begin 20e eeuw worden beide opvattingen als dualisme geaccepteerd.

Overziet men de ontwikkelingslijn, dan bemerkt men dat langzamerhand het innerlijk van de mens verdween uit het denken over licht, terwijl de uiterlijke aspecten van het licht en het zintuiglijke waarnemen steeds gedetailleerder beschreven werden. In de moderne visie op licht is de samenhang tussen mens en wereld mechanistisch geworden, terwijl het denken over God, de ziel of de menselijke geest als onbruikbaar of niet ter zake dienend terzijde is geschoven. Goethe heeft met zijn kleurenonderzoek een andere benadering gekozen en getracht, door exacte en systematische waarneming, uit de uiterlijke verschijnselen de innerlijke kwaliteiten van het licht op het spoor te komen. Daarmee heeft hij een belangrijke aanzet gegeven tot de fenomenolgische beschouwing van licht/donker en kleur.

De ontwikkeling ten aanzien van het beleven van kleuren is karakteristiek voor de ontwikkeling van de mens zelf. Volgens Rudolf Steiner leefde de mens tijdens de oude indische cultuurperiode (7000-5000 v.C.) nog in een onscherpe waarneming van de uiterlijke wereld, die voor de mens zichtbaar werd in tinten van magenta. In de geschriften van Homerus wordt de kleur blauw niet genoemd. In aansluiting op het Egyptische natuur- en kleurbeleven stond voor Homerus blauw voor duisternis en groen voor licht. Het onscherpe waarnemen blijft nadien nog lang bestaan, zelfs Ptolemaeus (90-168) spreekt er nog over in zijn geschriften. De huidige mens is er juist voortdurend toe geneigd op dingen te focussen en de meer diffuse waarneming van het geheel te verwaarlozen. Het diffuse, sferisch waarnemen, dat bijvoorbeeld past bij het kijken naar de sterrenhemel, werd historisch gezien dan ook het eerste ontwikkeld. Men zag allerlei wezens en lichtgestalten aan de hemel in plaats van de uiterlijke puntwaarneming, zoals wij die kennen. De mens van nu is geïndividualiseerd en daardoor op zichzelf komen te staan. Hij is een zelfstandig individu geworden, maar wel geïsoleerder van de natuur en de kosmos komen te staan. In samenhang met het minder dromend naar buiten en meer wakker naar binnen gericht zijn heeft de mens ook het zintuiglijke vermogen ontwikkeld, de meer met de duisternis en verinnerlijking verbonden kleuren blauw en violet waar te nemen.

Kijkt men vanuit een geestelijk gezichtspunt naar kleur, dan kan men aan de rondgang in de kleurencirkel, die de mens heeft doorlopen door gaandeweg het vermogen te ontwikkelen nieuwe kleuren waar te nemen, de evolutie van de mens aflezen.

magenta (de mens leeft nog in het hemelse licht)

rood

oranje

geel

groen (aarde-licht, de mens wordt aarde-gericht)

groen (natuur)

blauw (geïsoleerde, eenzame, verinnerlijkte mens)

violet (verinnerlijking wordt weer spirituele r)

De rode kant van het spectrum vertegenwoordigt geestelijk gezien de oorsprong van de mens, de warme oerbron, waar zijn levensvitaliteit mee samenhangt (zoals rood ook het meest vitale karakter heeft). Blauw vertegenwoordigt de individualisatie, de geïsoleerde en koude kant, waar de verinnerlijking inzet. Blauw is echter de kleur van deze tijd.

Bij kleurenblindheid voor de rode kant van het spectrum ziet men een mogelijke samenhang met het moeite hebben een verbinding met de eigen, uit het voorgeboortelijke stammende impulsen tot stand te brengen. Kleurenblindheid voor het blauwe deel van het spectrum - wat minder voorkomt onder de westerse bevolking - zou een uiting zijn van het moeite hebben zich met de impuls tot individualiseren en de eenzaamheid die daarmee gepaard gaat, te verbinden.

4.7 Meervoudige systemen

Het zoeken naar de al-ene kracht die ten grondslag ligt aan de hele schepping, vormde een middeleeuwse traditie, die samenhing met het zoeken van het centrum van de Godheid in de mens zelf. Dat de latere wetenschap dit principe ook toepaste op de natuur is een typisch voorbeeld van een waarheid die tot paradigma werd. In dit boek hebben wij geprobeerd een visie te ontwikkelen die met meervoudige en relatief

zelfstandige, maar wel samenwerkende systemen rekent. De Griekse wijsgeren, maar ook een Leibniz met zijn monadenleer, lazen dit principe af aan de natuur. Ook Goethe, met zijn denken in polariteiten en tendensen, en Rudolf Steiner met zijn meervoudige mensbeeld en zijn gefaseerde wereldontwikkeling, vertegenwoordigden dit gezichtspunt.

In deze tijd is de mens er niet toe geneigd in veelheden te denken. De vier fundamentele krachten die men in de natuurkunde nu kent, wil men het liefste gereduceerd zien tot één enkele kracht. Men streeft unificering van de fenomenen na en heeft geen oog voor het unieke samengaan van een veelheid aan tendensen. Dit betekent dat men te veel opgaat in het abstracte denken en daarmee de realiteit verlaat. Het geboden alternatief draagt de mogelijkheid in zich, dat de mens zich werkelijk met de wereld kan verbinden en zijn eigenheid daarbij kan behouden.

Voor de lichtleer komt men tenminste op twee tendensen of monaden, die in de zin van Goethe een samenwerkende polariteit vormen: licht en duisternis. De lichttendens wil alles verbinden, één laten worden, ruimte en bewustzijn creëren en vormen laten ontstaan. De duisternis wil alles scheiden, maar ook tot een ongevormde oer-eenheid terugbrengen, ruimtelijk laten worden en verinnerlijking laten ontstaan. Aardse stoffen dragen beide aspecten in zich, ze zijn licht- en duisternisnatuur. Zij tonen hun vorm en kleur in de lichtruimte. Dit is geen kwestie van weerkaatsing, maar een activiteit van het object zelf. Een voorwerp kan zich des te beter tonen naarmate het licht intenser is. Een bloem, een stuk hout, een tafel of gordijn laten zien hoe ze zijn. Er is geen sprake van absorptie of reflectie in de abstracte zin waar zo vaak over gesproken wordt.

De duisternistendens komt tot uitdrukking in het conserveren en ondoordringbaar maken van natuur. De blijvende vorm van een plant is het resultaat van samenwerking van licht en duisternis. Het licht toont de plant, de duisternis maakt hem tot blijvend fenomeen.

In deel I, paragraaf 4.9.4, werd de wereldontwikkeling in vier fasen, zoals door Steiner beschreven is, in samenhang gebracht met vier warmteprocessen. De vroegere saturnus-, zon-, maan- en de huidige aardefase zijn nog altijd werkzaam in de natuur en werken hierdoor modificerend in op de verschijningsvormen van de warmte. Zo ontstaan de corresponderende fenomenen warmteverbondenheid, straling, uitzetting en geleiding.

Ook voor het gebied van de licht- en duisternisfenomenen is een dergelijke indeling zinvol. Zonder veel uitleg wordt hier een overzicht gegeven van een mogelijke indeling:

evolutiefasen	*lichtaspect*	*duisternisaspect*
saturnus	warmte	dofheid
zon	kleur	ondoorzichtigheid
maan	spiegeling	gladheid
aarde	vorm	bestendigheid

Omdat licht een sterk ruimtelijk karakter heeft en geen tijdsfenomeen is zoals de warmte, komen de vier aspecten alle tegelijk voor en zijn zij afhankelijk van elkaar.

4.8 Aarde, zon en sterren

Probeert men het paradigma los te laten dat de hele kosmos ongeveer is zoals de aarde: dingachtig, meetbaar en ruimtelijk, dan ontstaat de mogelijkheid dat zich andere inzichten kunnen ontwikkelen. De feitelijke waarneming moet natuurlijk boven alles serieus genomen worden, maar de poging om de eigen vooronderstellingen gewaar te worden biedt al ruimte aan nieuwe benaderingen. Een beperkt aantal essentiële fenomenen zal nu beschreven worden en als leidraad gebruikt voor een voorzichtige poging om gedachten te ontwikkelen die recht doen aan de fenomenen.

Aarde

De aarde heeft een bolvormige gestalte. Op het noordelijke halfrond is meer land, op het zuidelijke meer water. Het vaste aardoppervlak is hard, ondoorzichtig en gelaagd van structuur. Het vormt een geheel, maar bestaat uit schollen die aan elkaar grenzen en langzaam bewegen. De atmosfeer van de aarde is sterk gelaagd en aan veel onvoorspelbare veranderingen onderhevig.

Alleen op aarde is leven mogelijk. Nog nergens is na honderd jaar onderzoek buiten de aarde enig spoor van leven vastgesteld. Voor de mens is de aarde het middelpunt van de kosmos. Ook al is hij niet geheel een natuurwezen, zijn woonplaats is de aarde, in samenhang met planten- en dierenleven en de kosmos, met name de zon. Het leven op aarde speelt zich af aan het oppervlak en in de zeeën. De samenhang tussen water, lucht en leven is nog relatief makkelijk te doorgronden, daar is al veel over bekend. Hoe echter het binnenste van de aarde, de planeten en de sterren met het leven samenhangen, is nog in nevelen gehuld. De aarde is van zich uit warm, maar niet lichtend. De aarde heeft zelf een dagritme, een maanritme in samenhang met de maan en een jaar/seizoenenritme in

relatie met de zon. De veranderingsprocessen in de atmosfeer en op het aardoppervlak zijn in dynamische relatie met alle leven, de gestalte van de aarde zelf verandert echter maar langzaam. Van aardse stoffen kan men een lichtspectrum maken door deze te verbranden. Iedere stof heeft daarbij een specifieke lichtgestalte (lijnenspectrum).

Zon

De zon heeft een exact ronde vorm en is ondoorzichtig. Het is een warmte/lichtgestalte van een vrij constant karakter. Het zonneoppervlak is in een continue chaotische beweging (granulatie). De zonneatmosfeer is gigantisch groot en vele facetten zijn te onderscheiden, zoals zonnevlammen, zonnewind, corona en radiostraling. De zonnevlekken aan het oppervlak hebben een zeer wisselende verschijningsduur van enkele uren tot meerdere maanden en zijn sterk magnetisch. Ze bewegen al roterend met de zon van pool tot evenaar. Het vlekkenmaximum ligt op 17°/18° en het minimum op 5°, een nieuwe cyclus zonnevlekken begint op 35° noorder- en zuiderbreedte. De rotatietijd van de zon, afgelezen aan de zonnevlekken, is aan de evenaar 25 dagen en neemt naar de polen toe tot meer dan 30 dagen. Het warmte-, licht- en radiospectrum van de zon is zeer complex van structuur. Het lichtspectrum is continu, met veel donkere lijnen er in.

Sterren

Sterren worden waargenomen als lichtpunten. Vanuit de waarneming is er geen dwingende reden aan te nemen dat het gasbollen zijn. Ook hier zijn de wetenschappelijke denkbeelden die men over sterren heeft gevormd in hoge mate voortgekomen door de wens, het fenomeen ster te willen herleiden tot bekende aardse fenomenen.

De positie van sterren aan de hemel verandert jaarlijks nauwelijks, hoewel sommige een minimale eigen beweging hebben. Spectroscopisch worden de sterren verdeeld in zeven hoofdklassen, waarbij de kleur verloopt van rood/blauw naar rood en het aantal lijnen in het spectrum toeneemt. Er zijn ook ritmisch veranderlijke sterren, waarbij het spectrum en de lichtintensiteit variëren. De meeste sterren vertonen een roodverschuiving die per ster weer verschillend is.

In plaats van het aardse als primair fenomeen te nemen en te veronderstellen dat de zon en de sterren een verwant karakter hebben, kan men met evenveel recht de zon of de sterren als primair fenomeen kunnen nemen. Dan zou men de aarde kunnen betitelen als gestold sterrenlicht of iets dergelijks. Hier willen we aarde, zon en sterren als drie onafhankelijke samenwerkende entiteiten nemen.

Beschouwt men de fenomenen, dan komt de tegenstelling licht↔stof naar voren. De aarde kan beschouwd worden als de stof/duisterniskant van de kosmos. De gelaagde, ondoorzichtige gestalte staat voor de duisternis. De aarde is dingachtig en ruimtelijk, met een grote veelheid aan specifieke stoffen. De sterren vertegenwoordigen dan de lichtkant van de kosmos. Zij tonen zich niet stoffelijk, aards. Het sterrenlicht verschijnt als punten in de ruimte en de vaste compositie spreekt een taal van tekens/beelden, niet van processen. Het is voor de gangbaar wetenschappelijk geschoolde mens niet eenvoudig de gedachte toe te laten, dat de sterrenwereld de verschijning is van licht in de ruimte zónder aardse stofprocessen. Als fenomeen doet het zich echter voor als een wereld van spontaan licht. Zoals het vanzelfsprekend is dat er materie in de wereld is, zo geldt ook voor het sterrenlicht dat het gewoon ís. Materieloos licht en lichtloze materie zijn de primaire gegevens die zich aan ons voordoen. De ene volledig uit de ander te willen verklaren is een opgelegde eenzijdigheid, die geen recht doet aan de fenomenen.

Accepteert men eenmaal de originele tegenstelling van licht en stof, dan kan men verder gaan zoeken naar het typische van deze tegenstelling. De aarde vertegenwoordigt de tastwereld en de sterrenhemel de beeldwereld: hij doet zich voor als een constellatie van beelden. Sterren zijn geen dingen, maar lichtbeelden. Echter geen beelden zoals op een scherm, maar zichzelf uitsprekende en manifesterende beelden.

Hoe ruimte en tijd in relatie staan tot de sterren en de aarde vraagt nog een grondig onderzoek. De aardse ruimte en de sterrenruimte mogen echter niet op voorhand aan elkaar gelijk worden gesteld. Een mogelijke zoekrichting biedt de polariteit van punt en oneindigheid uit de projectieve meetkunde. De aarde kan daarbij als kern of gevulde puntruimte worden beschouwd en de sterren als oneindige vlakkenruimte getypeerd. Iets overeenkomstigs geldt voor de tijd. De aardse processen zijn sterk ingebed in veranderingen, het heden is altijd overheersend aanwezig. De sterren daarentegen staan voor het verleden en mogelijk ook voor de toekomst. Zij drukken in beelden een wereld van orde en regelmaat uit.

De zon heeft beide aspecten in zich, stoffelijkheid en lichtnatuur. De zonneatmosfeer en het zonneoppervlak hebben aardse aspecten, terwijl het inwendige en het beeld van de zon als zodanig sterrenaspecten heeft. Rudolf Steiner beschreef de zon als tegenruimte. Hij bedoelde daarmee dat de zon niet gevuld is, maar alleen omhuld. De zon vertegenwoordigt spontaan licht en materie. De zon creëert namelijk niet alleen een kosmische, planetaire lichtruimte, maar straalt ook materie de ruimte in.

Vanuit de projectieve meetkunde kan men het oneindigheidsbegrip verbinden met het licht. De schijnbaar donkere kosmos is een lichtruimte.

De sterren als lichtpunten/lijnen raken de ruimte nog net aan. Het projectieve eindigheidsbegrip kan men met de materie/duisternis verbinden. De aarde, maan en dergelijke zijn volledig ruimtelijk en zijn uitdrukking van duisternis. De aarde en de maan kunnen meelichten in de kosmische lichtruimte.

AANBEVOLEN LITERATUUR

Algemeen

Meys, J.: *Puberteit. De smalle weg naar innerlijke vrijheid,* Zeist 1996.

Steiner, R.: *Algemene menskunde als basis van de pedagogie,* Zeist 1993.

Steiner, R.: *Menskunde en opvoeding,* Amsterdam, 1990.

Landweer, P.: *Natuurkunde (6e/7e klas),* VPC Driebergen 1995.

van Gils, Veenman, Schukking: *Natuurkunde,* (deel I), VPC Driebergen 1994.

Amons, Beekman, van Romunde: *Antroposofie en natuurwetenschap,* Zeist 1981.

Siepman van den Berg, B.: *Twaalf denkrichtingen,* Driebergen 1996.

Hemleben, J.: *Das haben wir nicht gewollt,* Stuttgart 1978.

Romunde, R. van: *Materie en straling in ruimte en tijd,* (2 delen), Zeist 1979/1981.

Baravalle, H. von: *Physik als reine Phänomenologie,* (3 delen), Bern 1951/1955.

Marti, E.: *Die vier Aether,* Dornach 1994.

Adams, G.: *Strahlende Weltgestaltung,* Dornach 1965.

Unger, G.: *Vom Bilden physikalischer Begriffe,* (3 delen), Stuttgart 1959/1961/1967.

Lehrs, E.: *Man or matter,* Londen 1985; *Mensch und Materie,* Frankfurt a.M. 1987.

Whicher, O.: *The heart of the matter,* Londen 1997.

Bernard, A.: *Projective Geometrie,* Frankfurt a.M. 1953.

Heitler, W.: *Der Mensch und die naturwissenschaftliche Erkenntnis,* Braunschweig 1961.

Fraunberger, F.: *Das Experiment in der Physik,* Braunschweig 1984.

Diverse nummers van de tijdschriften:
Vrije Opvoedkunst, Den Haag.
Erziehungskunst, Stuttgart.
Die Drei, Stuttgart.
Elemente der Naturwissenschaft, Dornach.
Mathematisch-physikalische Korrespondenz, Dornach.

Nieuwe visies in de natuurwetenschap

Steiner, R.: *Geisteswissenschaftliche Impulse zur Entwickelung der Physik,* (2 delen), Dornach 1987/1982.

Romunde, R. van: *Grenzen van het natuurwetenschappelijke inzicht,* Driebergen 1995.

Ploum, A.: *Spiegel van het universum,* Landgraaf 1996.

Goswani, A.: *The selfaware universe,* New York 1997.

Sheldrake, R.: *Een nieuwe levenswetenschap,* Utrecht 1992.

Bohm, D.: *Heelheid en de impliciete orde,* Rotterdam 1985.

Capra, F.: *Het levensweb,* Utrecht 1996.

Davies, P.: *The mind of God,* Londen 1993.

Zukav, G.: *De dansende woe-li meesters,* Amsterdam 1991.

Weizäcker, F. von: *Die Einheit der Natur,* München 1971.

Heisenberg, W.: *Fysica in perspectief,* Utrecht 1974.

Prigogine, Stengers: *Dialog mit der Natur,* München 1981.

Met name voor klas 10

Julius, F.: *De klank tussen geest en stof,* Zeist 1983.

Schatz, P.: *Rhythmusforschung und Technik,* Stuttgart 1975.

Schwenk, Th.: *Das sensibele Chaos,* Stuttgart 1976.

Macauley, D.: *Over de werking van de kurketrekker en andere machines,* Houten 1988.

Meffert, E.: *Nikolaus von Kues,* Stuttgart 1982.

Hemleben, J.: *Johannes Kepler,* Reinbeck 1971.

Met name voor klas 11

Cantz, R.: *Wesenszüge der Elektizität,* Dürnau 1986.

Blattmann, G.: *Die Sonne, Gestirn und Gottheit,* Stuttgart 1972.

Greenpeace: *Zwartboek over het nucleaire tijdperk,* Weert 1989.

PLON: *Ioniserende straling,* Utrecht 1984.

Pohl, R.: *Optik und Atomphysik,* Berlijn/New York 1976.

Pohl, R.: *Einführung in die Physik,* (3 delen), Berlijn 1960.

Fraunberger, F.: *Illustrierte Geschichte der Elektrizität,* Keulen 1985.

Bergman, Schaefer: *Experimental physics,* Berlijn 1945.

Kohlrauch, F.: *Praktische Physik,* (2 banden), Berlijn 1946.

Konig, H.: *Unsichtbare Umwelt,* München 1977.

Met name voor klas 12

Goethe, J.W. von: *Farbenlehre,* Stuttgart 1988; *Kleurenleer,* Zeist 1991.

Julius, F.: *Entwurf einer Optik,* Stuttgart 1984.

Maier, G.: *Optik der Bilder,* Dürnau 1986.

Proskauer, H.: *Zum Studium von Goethes Farbenlehre,* Basel 1968.

Mackensen, M. von: *Optikunterricht,* Kassel 1987.

Renesse, R. van: *Bouw van een waterprisma*, artikel in de bundel *Goethe's kleurenleer*, Den Haag 1989.

Zajonc, A.: *Catching the light,* Oxford 1995; *Het licht zien,* Zeist 1996.

Falck-Ytter, H.: *Das Polarlicht,* Stuttgart 1983.

Können, G.: *Gepolariseerd licht in de natuur,* Zutphen 1980.

Bühler, W.: *Nordlicht, Blitz und Regenbogen,* Dornach 1977.

Greenler, R.: *Rainbow, halos and glories,* Cambridge 1980.

Minnaert, M.: *Natuurkunde van het vrije veld,* Zutphen 1980.

Verhulst, J.: *Der Glanz von Kopenhagen,* Stuttgart 1994.

Scientific American: *Reading atmospheric phenomena,* San Francisco 1980.

ISBN 90-800739-5-4

tituut voor
planontwikkel