

NATUUR- KUNDE

- Het Vrije School-leerplan
- Fenomenologie als methodiek
- Leerstof voor de 9e klas

JAN VAN GILS
KEES VEENMAN
PETER SCHUKKING

VRJ
PEDAGOGISCH
CENTRUM

LEERPLAN
WERKBOEK

9

NATUURKUNDE

Het Vrije School-leerplan
Fenomenologie als methodiek
Leerstof voor de 9e klas

Resultaten
van het ontwikkelingsprojekt
NATUURKUNDE VRIJE SCHOLEN

1e Deel

Jan van Gils
Kees Veenman
Peter Schukking

Auteurs: Jan van Gils, Kees Veenman, Peter Schukking
Tekeningen: Ben Geels en afdeling vormgeving SLO
Begeleiding: Rob de Kievit, Rupert Genseberger
Tekstverwerking: Mathilde Köiter
Omslagontwerp: Peter Vormer
Typografie omslag en titelblad: Peter de Gruyl
Druk: Brink, Soest

De figuren 43, 58, 60 en 61 zijn ontleend aan *Kennis van Werktuigen*, Wolters, 1967. De figuren 56b,c,d en 57 zijn ontleend aan *Wie funktioniert das?* Spectrum, 1968. Figuur 56a is ontleend aan *Machines en Motoren*, v.d. Hout & Co., 1962.

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

Uitgegeven door en verkrijgbaar bij:
Stichting Vrij Pedagogisch Centrum
Hoofdstraat 20, 3972 LA Driebergen, tel. 03438-21114

© Instituut voor Leerplanontwikkeling, Enschede

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

ISBN 90-800739-3-8

september 1994

INHOUDSOPGAVE

Inleiding

Ontstaan en doelstelling van het project Natuurkunde Vrije Scholen	5
1. Menskunde als grondslag voor de pedagogie	9
2. Het leerplan natuurkunde in de Vrije Scholen	19
3. Fenomenologie in het onderwijs	32
3.1 Inleiding	32
3.2 De gangbare wetenschap en het modeldenken	32
3.3 Goetheanistische fenomenologie	36
3.4 Fenomenologie in de lespraktijk	42
3.4.1 Inleiding	42
3.4.2 Het experiment	43
3.4.3 De verwerking van proeven	45
3.4.4 De beschouwing	46
3.4.5 Afronding	52
4. Warmteleer	53
4.1 Inleiding	53
4.1.1 Warmteleer in de achtste klas - elementenleer	53
4.1.2 Warmteleer in de negende klas	56
4.2 Periodeopzet	57
4.3 De proeven	59
4.3.1 Inleiding	59
4.3.2 De ervaringsreeks	59
<i>Twee voorbeelden van ervaringsreeksen</i>	
4.3.3 De waarnemingsreeks	64
<i>Zeven voorbeelden van waarnemingsreeksen</i>	
4.3.4 Een rouleerpracticum warmteleer	79
4.4 Beeldvorming	83
<i>Drie voorbeelden van beeldvorming</i>	
4.5 Begripsvorming	84
<i>Acht voorbeelden van begripsvorming</i>	
4.6 Ideeënvorming	118
<i>Twee voorbeelden van ideeënvorming</i>	
4.7 Opgaven en opdrachten	122
4.7.1 Opgaven	122
4.7.2 Opdrachten en proefwerken	126

4.8	Technologie	128
4.8.1	Inleiding	128
4.8.2	De warmtemachines	129
4.9	Ideeënvorming ten behoeve van de docent	140
4.9.1	Inleiding	140
4.9.2	Warmte in relatie tot de mens	140
4.9.3	Rudolf Steiners 2e natuurwetenschappelijke cursus	143
4.9.4	De afdruk van de vier aardfasen in warmteverschijnselen en warmteprocessen	147
4.9.5	Projectieve meetkunde	156
4.9.6	De warmteleer in historisch perspectief	169
5.	Elektriciteitsleer	178
5.1	Inleiding	178
5.2	Periodeopzet	179
5.3	De proeven	179
5.3.1	Inleiding	179
5.3.2	Uitgewerkt voorbeeld van een ervaringsreeks	180
5.3.3	Uitgewerkte voorbeelden van een waarnemingsreeks	181
	<i>Vijf voorbeelden van waarnemingsreeksen</i>	
5.3.4	Een rouleerpracticum elektriciteit/magnetisme	188
5.4	Beeldvorming	191
	<i>Twee voorbeelden van beeldvorming</i>	
5.5	Begripsvorming en ideeënvorming	193
	<i>Drie voorbeelden van begrips- en ideeënvorming</i>	
5.6	Opgaven	202
5.7	De technische toepassing	204
5.8	Enkele historische gegevens	210
5.8.1	De ontwikkeling van de elektriciteitsleer en haar toepassingen	210
5.8.2	Faraday en de ontdekking van de inductie	212
	Literatuurlijst boeken en tijdschriften	215

INLEIDING

Ontstaan en doelstelling van het project Natuurkunde Vrije Scholen

Het leerplan van de Vrije School is gebaseerd op de menselijke ontwikkeling zoals die door de antroposofie kenbaar wordt. Dat is eenvoudig gezegd, maar voor de praktijk van het onderwijs impliceert het nogal wat. Niet alleen eist het van de leraar dat hij zich grondig in het antroposofische mensbeeld verdiept, maar ook moet dit mensbeeld zo in hem gaan leven, dat hij er in het werken met de leerlingen vanuit zichzelf naar kan handelen. Pedagogisch werkzaam wordt een mens- en wereldbeeld nog niet door het te kennen, maar doordat men het incorporeert in zichzelf, men het *is*. Toen met het schooljaar 1921/1922 de eerste 10e klas van de Freie Waldorfschule te Stuttgart van start zou gaan, zei Rudolf Steiner het in de lerarenvergadering als volgt:

*'Nun kann natürlich in unsere Schule das eigentliche Geistesleben nur dadurch hineinkommen, dass sich unsere Lehrerschaft eben aus Anthroposophen zusammensetzt. Dadurch, nicht durch das Lehren der Anthroposophie - unsere Schule darf eben nicht Weltanschauungsschule sein -, aber durch die ganze Art und Weise, wie sich unsere Lehrer verhalten, durch dasjenige, was sie in ihrer Seele tragen, wird wie durch seelische Imponderabilien das Geistig-Seelische in unsere Schule hineingetragen.'**

Bij zo'n doelstelling is het begrijpelijk, dat voor het leerplan in eerste instantie sterk gesteund moet worden op datgene dat uit het inzicht van Rudolf Steiner zelf aan leerplanaanwijzingen is aangereikt. Tegelijk stelt het de leraren voor de opgave al werkende het leerplan verder inhoud en gestalte te geven. Dat betekent een reële uitbreiding van de leraarstaak: naast pedagoog ook leerplanontwikkelaar! Beide taken kunnen pas werkelijk productief worden, als de school zodanig is ingericht, dat wat aan ideeën ontwikkeld wordt in wisselwerking kan komen met inzichten en ervaringen van collega's en gemeenschappelijk goed wordt, waaruit de dagelijkse praktijk inspiratie en richting ontvangt. Dat vraagt om een sociale structuur en een bestuurlijke vorm waarbinnen een voortdurende betrokkenheid van alle participanten kan plaatsvinden. De Vrije Schoolleeraar staat dus voor een drievoudige taak, die appelleert aan zijn totaliteit als mens: hij is pedagoog, onderzoeker en bestuurder.

* Zie *Menschenkenntnis und Unterrichtsgestaltung*, voordracht van 15 juni 1921.

Op het gebied van de natuurkunde is net als bij andere vakgebieden vanaf de start van de Vrije School, nu ruim zeventig jaar geleden, voortdurend aan het leerplan gewerkt. De neerslag van dat werk manifesteert zich in de gangbare praktijk van het natuurkundeonderwijs in de Vrije Scholen. Ondanks de ervaring die daarmee in de loop van de tijd is opgebouwd, doet zich telkens weer opnieuw de behoefte voor gedane keuzes en ontstane vormen op hun pedagogische waarde te toetsen en door systematisch onderzoek tot verdere verdieping te brengen. Die behoefte kan in die ene zin worden samengevat, die elke leraar van tijd tot tijd in zich voelt opkomen, of hij nu aan het begin van zijn leraarsloopbaan staat of al een lange onderwijspraktijk achter de rug heeft: 'Waarom doe ik eigenlijk wat wanneer en hoe?' In zijn onderdelen uiteengelegd: *waarom?* - het eigenlijke pedagogische motief; *wat?* - de leerstofinhoud; *wanneer?* - het ontwikkelingspsychologische aspect; *hoe?* - de didactiek.

Op die vragen wordt op diverse plaatsen ingegaan. Door leraren individueel, in pedagogische vergaderingen, in vakgroepbijeenkomsten, op landelijke of internationale conferenties. Allerlei studie wordt verricht; veel daarvan blijft onzichtbaar of vervliegt na verloop van tijd weer. Een klein gedeelte wordt zodanig verdiept, dat de vruchten niet alleen voor de incidentele lessituatie betekenis hebben, maar een fundamentele verrijking van het leerplan vormen. Wil die verrijking ook anderen ten goede komen, dan vraagt dat om gerichte actie. Zo'n situatie deed zich met betrekking tot het natuurkundeonderwijs in de Vrije School voor in de loop van 1986, toen Jan van Gils een brief schreef aan het Vrij Pedagogisch Centrum, waarin hij de voorbereidingen aankondigde tot het oprichten van een natuurkundig onderzoeksinstituut en daarvoor om medewerking vroeg van de Vrije Schoolbeweging.

Deze stap kan als het geboortemoment beschouwd worden van wat zou uitgroeien tot het Project Natuurkunde Vrije Scholen, dat nu met het voorliggende leerplanwerkboek in zijn eerste officiële publikatie uitmondt. Dat is nog een hele weg geweest. Een eerste realisatie van het onderzoeksinstituut kwam in 1987 tot stand met een driedelig doel:

- fundamenteel algemeen methodisch onderzoek;
- uitwerking van een stuk leerplan met proefbeschrijvingen en practica;
- begeleiding van het natuurkundeonderwijs aan Vrije Scholen.

Jan van Gils nam de uitvoering op zich, een werkruimte werd ter beschikking gesteld door het Louis Bolk Instituut te Driebergen, twee collega's, Jan Mienis en Kees Veenman, waren nauw betrokken bij het project en het VPC garandeerde voor twee jaar de financiering van materiaal, huur en reiskosten. De start was gemaakt.

Terwijl intern aandacht besteed werd aan literatuurstudie en de opbouw van een laboratorium, werden naar buiten toe cursussen en studiebijeenkomsten verzorgd. Intussen werd met het oog op de continuering van de activiteiten contact gelegd met het Instituut voor Leerplanontwikkeling SLO te Enschede om na te gaan of ondersteuning voor het onderzoeksproject kon worden verkregen. Dit contact resulteerde in de formele aanvraag om voor de drie jaren 1991 tot en met 1993 het Natuurkunde - Leerplanproject Vrije Scholen in het programma van SLO op te nemen. Op 9 april 1990 werd daarover positief beschikt.

Doelstelling van het project was het verbeteren en vernieuwen van het natuurkundeonderwijs op de Vrije Scholen in Nederland, met een mogelijke uitstraling naar het reguliere onderwijs, en de uitwerking van leerplanvoorstellen en voorbeeldlesmateriaal voor natuurkundeleraars vanuit ontwikkelingspsychologische gezichtspunten. Ervaringen uit de lespraktijk en resultaten van vakdidactisch en pedagogisch onderzoek vormden hiervoor de basis. De fenomenologische methode, zoals door Goethe ontwikkeld en door Steiner uitgewerkt, stond centraal. De uitvoering van het project berustte bij Jan van Gils, die naast het onderzoekswerk ook de contacten met de collega's in het veld verzorgde; de verantwoordelijkheid voor de begeleiding was in handen van een begeleidingscommissie, die bestond uit Jaap Verhoog en Rob de Kievit namens SLO, Hans Passenier en Kees Veenman als vakcollega's en Peter Schukking namens het VPC.

In het eerste jaar lag het accent op de inhoudelijke doorwerking van het leerplan, in het bijzonder de leerstof van de 9de klas, en werd op grond van literatuurstudie een uitgebreide literatuurlijst voor alle leerjaren samengesteld. In het tweede jaar werd de eerste versie geschreven van wat moest worden 'een inspiratieboek voor natuurkundeleraars'. Daarin werden drie onderdelen onderscheiden: 1) de ontwikkelingspsychologie en het daarop geënte leerplan; 2) de methodiek; 3) de leerstofinhoud warmte en elektriciteit. In die fase van het project werden Kees Veenman en Peter Schukking inhoudelijk bij het werk betrokken; de eerste schreef de tweede versie van de delen over methodiek en leerstof, de tweede de inleidende hoofdstukken. In de begeleidingscommissie vond intussen een wisseling van de wacht plaats: Hans Passenier en Jaap Verhoog stapten uit en Rupert Genseberger en Ben Geels traden toe.

Reeds in de loop van het eerste jaar werd duidelijk, dat binnen het bestek van dit project naast de algemene pedagogische en methodische beschouwingen alleen de uitwerking van de 9e klas leerstof zijn beslag kon krijgen. Dat riep uiteraard de behoefte op aan een vervolgproject, waarin op de reeds gelegde basis de leerstofinhoud 10, 11 en 12 uitgewerkt kon worden. Een aanvraag voor zo'n vervolgproject werd bij SLO

ingediend en gehonoreerd, waardoor per 1-1-1994 een naadloze overgang gemaakt kon worden van het eerste naar het tweede project en parallel aan de afronding van deze eerste publikatie de aanzet tot de volgende kon worden gegeven.

Wat is nu met de publikatie van dit leerplanwerkboek bereikt? Is daarmee het doel dat voor ogen stond gerealiseerd, is hiermee het Vrije Schoolonderwijs en wellicht ook het onderwijs in wijder verband gediend? Zal het leiden tot een kwaliteitsverbetering van het onderwijs en waaruit zou die dan zijn af te lezen? Vragen die niet zomaar te beantwoorden zijn, die verwijzen naar de toekomst, waarin de praktijk van het leven zal moeten uitwijzen wat vruchtbaar is en wat niet. Met de voldoening een bepaald werk tot een eind gebracht te hebben, mengt zich het gevoel van zorg over hoe het verder zal gaan, zoals bij de leraar die zijn leerlingen aan het einde van de schooltijd de wereld in ziet trekken dat mengsel van hoop en zorg opkomt dat kenmerkend is voor de overgang naar een nieuwe fase. Maar een paar zaken zijn in elk geval vast te stellen. Ten eerste dat de samenwerking in het kader van dit project tussen alle betrokkenen plezierig en helder was en de openheid van diegenen die niet zelf in het Vrije Schoolonderwijs staan voor de opvattingen die daaraan ten grondslag liggen die samenwerking zeer bevorderde. Ten tweede dat de gelegenheid om ontwikkelde ideeën en ervaringen op het vakgebied in zo'n vorm te brengen, dat ze voor anderen toegankelijk worden, tevens een uitdaging is die uitnodigt tot nieuwe activiteit. Ten derde dat datgene wat nu op schrift staat en ter beschikking wordt gesteld van ieder die op het vakgebied van de natuurkunde pedagogisch geïnteresseerd is, zeker van zodanig niveau is, dat het als impuls voor het onderwijs waardevolle diensten kan bewijzen.

Daarmee komen we aan de kern van het leerplanontwikkelingswerk. Het hier gepresenteerde resultaat is het einde van een proces, maar tegelijkertijd het mogelijke begin van een nieuw proces. Het is als zaad: op zichzelf is het niets en kan het niets nieuws verwekken. Maar valt het in vruchtbare bodem, dan blijkt het een soms verbluffende potentie tot nieuwe levensontplooiing te bezitten. Moge het zo ook gaan met dit boek. Met de wens, dat het een vruchtbare bodem zal vinden in mensen die vernieuwend willen werken in de pedagogie en die, geïnspireerd door de geesteswetenschappelijke werkwijze van de antroposofie, tot de overtuiging gekomen zijn dat vernieuwing van de natuurwetenschap voor de ontwikkeling van mensheid en aarde van het grootste belang is, laten wij dit boek de wereld ingaan.

MENSKUNDE ALS GRONDSLAG VOOR DE PEDAGOGIE

Wil onderwijs meer zijn dan kennisoverdracht en meer dan vaardigheidstraining, wil onderwijs kinderen en jonge mensen werkelijk voorbereiden op het volwassen leven, dan kan dat alleen als het doortrokken is van pedagogie. Dat wil zeggen dat het in al zijn facetten zo is ingericht, dat het opvoedend werkt. Bij opvoeding heeft men een doel voor ogen, en wel het mensbeeld waartoe men de wordende mens wil opvoeden. Pedagogisch handelen vereist dus een bezinning op wat men als wezenlijk ziet voor de mens, op wat de mens in wezen is en hoe de groei-processen verlopen waardoor hij tot zijn bestemming kan komen. Menskunde vormt daarmee de basis voor pedagogie en onderwijs.

Het onderwijs op de Vrije Scholen is gebaseerd op de menskunde die door Rudolf Steiner op grond van zijn geesteswetenschappelijk onderzoek is ontwikkeld en in tal van publikaties en voordrachten is beschreven. Kernpunt van de onderzoeksresultaten is het inzicht, dat ieder mens een uniek wezen is dat, in samenspel met andere wezens, een lange ontwikkelingsgang doormaakt die door vele incarnaties op aarde heen gaat. Bij elke nieuwe belichaming treedt de menselijke individualiteit dus opnieuw in de aardewereld, waarbij de vruchten van het voorafgaande doorwerken in levenscondities en doelstellingen voor het nieuwe leven. De verbinding van de geestelijke individualiteit van de mens met het stoffelijke lichaam vindt plaats door middel van de menselijke ziel. De ziel vormt dus een middengebied, waarin de impulsen uit de geestelijke wereld en die uit de lichamelijke wereld elkaar ontmoeten en in wisselwerking treden. De manier waarop dit plaatsvindt is niet alleen afhankelijk van de gegeven geestelijke en lichamelijke condities, maar wordt ook in belangrijke mate beïnvloed door omgevingsfactoren. Hier ligt dus het aangrijpingspunt voor opvoeding en onderwijs: door op adequate wijze in te spelen op de zieleprocessen kan de stapsgewijs hechter wordende verbinding tussen geest en lichaam ondersteund worden en daarmee een gezonde basis worden gelegd voor het latere leven. Misgrepen op dit gebied kunnen levenslange schaden en handicaps tengevolge hebben.

Zoals de totale mens dus als driedigig wezen verschijnt met lichaam, ziel en geest, zo is deze driedigigheid op alle niveaus weer terug te vinden als fundamenteel verschijningsprincipe. Steeds geldt daarbij de wetmatigheid, dat twee uitersten die polair tegenover elkaar staan door een bemiddelend derde met elkaar in verbinding worden gebracht. Voor de pedagogie van groot belang is het onderscheid tussen de drie basis-

krachten van de ziel: het willen, het voelen en het denken. Tussen willen, de basis van het naar buiten gerichte handelen, en denken, de bezinnende omgang met ideeën, bestaat een constante wisselwerking doordat enerzijds waarnemingen en gedachten gevoelens oproepen die een impuls tot handelen leveren, anderzijds de handelingen gevoelens wekken die aanleiding geven tot bezinning. Cultivering van het gevoelsleven bij het opgroeiende kind is voor een evenwichtig en geïntegreerd in het leven staan dus een essentiële voorwaarde, zo goed als de ontwikkeling van een daadkrachtig wilsleven en een helder denkleven voor een vruchtbare en zinvolle levenspraktijk onmisbaar zijn.

Ook de lichamelijke constitutie van de mens vertoont een driedelige opbouw. In de onderdelen hoofd, romp en ledematen is die uiterlijk direct herkenbaar. Op grond van zijn onderzoek brengt Steiner hier nog een nadere nuancering in aan, doordat hij drie lichamelijke systemen onderscheidt die weliswaar hun zwaartepunt in genoemde lichaamsdelen hebben, maar zich alle drie door het hele lichaam vertakken: het zenuw-zintuigstelsel, het ritmische systeem en het stofwisselings-ledematensysteem. Het eerste omvat alle zintuigorganen en alle zenuwbanen met hun concentratie in ruggemerg en hersenen; het doortrekt het hele lichaam, maar heeft zijn duidelijke zwaartepunt in het hoofd. De andere pool, het stofwisselings-ledematenstelsel, omvat de spijsverteringsorganen, het spierstelsel en het skelet; ook dit systeem is werkzaam in het hele lichaam, maar met name in buik en ledematen. Tussen beide andere in staat het ritmische stelsel met als centrale organen hart en longen; het heeft dus zijn centrum in de borstholte, maar doordringt via ademhaling en bloedcirculatie eveneens het hele lichaam. Deze drie systemen hebben ieder hun autonome functie, maar zijn ten nauwste op elkaar afgestemd. Daarbij vervult het ritmische systeem als middelste weer de verbindende rol door de bewustzijns-activiteit van het zenuw-zintuigstelsel enerzijds en de vitale processen van het stofwisselings-ledematensysteem anderzijds in evenwicht te houden.

Uit deze beschrijving kan reeds duidelijk worden, dat tussen de drie lichamelijke systemen en de drie zielekrachten een nauwe relatie bestaat. Zoals alles wat waarnemings- en denkactiviteit is als psychisch proces zijn fysiologische grondslag vindt in zintuig- en hersenprocessen, zo hebben wilsactiviteiten hun lichamelijke grondslag in stofwisselingsprocessen en hangt het gedifferentieerde gevoelsleven onmiddellijk samen met de ritmische processen van ademhaling en bloedsomloop. Men kan dit bevestigd zien, wanneer men erop let hoe de zieleprocessen zich uiten. Denkinspanning ervaart men in het hoofd. Angst, schrik, vreugde, genegenheid manifesteren zich in de hartstreek door een stokkend of juist versneld ritme van ademhaling en bloedcirculatie. Het aangrijpingspunt

voor de wil openbaart zich wanneer men zich in beweging zet: een ruimtelijke verplaatsing komt alleen tot stand als spieren in werking treden, wat met bepaalde stofwisselingsprocessen gepaard gaat.

Lichamelijke constitutie en zielestructuur van de mens zijn geenszins statische systemen; ze maken gedurende het leven grote veranderingen door. Vooral de ontwikkelingen in de tijd tussen geboorte en volwassenheid zijn verstrekkend en, daar hierbinnen de feitelijke opvoeding plaatsvindt, voor de pedagogie van buitengewoon belang. Ze zijn ook buitengewoon gecompliceerd: het hele proces van volwassenwording heeft zoveel facetten, dat men het telkens opnieuw moet benaderen om het langzamerhand te doorgronden. Voor een uitvoerige beschrijving moet naar de vakliteratuur worden verwezen. Hier worden alleen enkele hoofdlijnen getrokken ter fundering van het hierna uit te werken leerplan natuurkunde.

De ontwikkeling van geboorte tot volwassenheid is dus te omschrijven als een incarnatieproces, waarbij de geestelijke individualiteit van de mens het door de ouders geschonken lichaam binnentreedt, gaat "bewonen" en tot instrument maakt om zijn levensopgave op aarde mee te realiseren. Het natuurlijke verloop van dat proces neemt 21 jaar. Het is globaal te verdelen in drie fasen van ieder zeven jaar, waarin driemaal, op een steeds hoger niveau, een proces doorlopen wordt, dat voert

- van een uit de wilspool opstijgende drang tot begrijpen
- via een sterk gevoelsmatige rijpings- en stabiliseringsfase
- tot een door het denken gericht handelen.

Deze driemaal zich voltrekkende gang, die hieronder nader uitgewerkt zal worden, kan ook als karakteristiek voor de gehele volwassenwording worden aangemerkt: in de eerste zeven levensjaren wordt de buitenwereld met een enorme (wils)kracht en vitaliteit "opgezogen", het jonge kind is een en al veroveringsdrang om zijn omgeving te (be)grijpen; in de volgende zeven jaar wordt alles wat opgenomen wordt met gevoelens verbonden en verinnerlijkt, het schoolkind koestert zijn eigen binnenwereld; in de tijd tussen 14 en 21 jaar rijpt het denken tot eigen vermogen, waarmee puber en adolescent zich actief ingrijpend op de buitenwereld richten. Hiermee is de grondtoon van deze drie grote levensfasen gegeven, waarop de pedagoog zijn handelen dient af te stemmen. Daarbij kan hij met vrucht gebruik maken van de in elk van deze zevenjaarsperiodes van nature aanwezige, de ontwikkeling stuwende kracht: die van de nabootsing bij peuter en kleuter, die van de bewondering bij het schoolkind, en bij de jeugdige mens die van het idealisme.

Zoals in de totale boog van 21 jaar de bovengenoemde driefasige ontwikkelingsgang in het groot herkenbaar is, zo is hij anderzijds in zijn

meest gecomprimeerde vorm terug te vinden in de eerste drie levensjaren van een kind. In die relatief korte tijd verovert het kind zich onder normale omstandigheden die drie vermogens, die het tot mens maken en waarmee het zich principieel van de dierenwereld onderscheidt: de rechtopstaande houding, de taal en (de eerste vorm van) het denken. In het oprichten, gaan staan en lopen uit zich de wilsimpuls tot uiteenzetting met de omringende wereld; door het spreken wordt de mogelijkheid geopend een verbinding te leggen tussen uitwendige indrukken en innerlijke gevoelens; met het eerste, nog sterk associatieve denken gaat een eerste doelgericht handelen gepaard. Als een soort oerbeeld van menselijke ontwikkeling staat deze periode van leren lopen - spreken - denken aan het begin van ieders levensloop.

Bekijkt men nu de drie zevenjaarsperioden nader, dan is in elk daarvan opnieuw de genoemde ontwikkelingsgang te herkennen. Zowel bij het kleine kind, bij het schoolkind als bij de jeugdige mens voltrekt zich het proces, waarin uit een nog ongericht aangrijpen van de buitenwereld via een verinnerlijkingsfase de sturing op grond van een bewuste doelstelling bereikt wordt. Dat het daarbij niet gaat om een herhaling van hetzelfde, maar om een stapsgewijs opklimmen naar een steeds hoger niveau, kan al uit het verschil in grondtoon van deze drie levensfasen blijken en zal naderhand nog verder onderbouwd worden.

In de eerste zevenjaarsperiode, waarvan begin en einde lichamelijk gemarkeerd worden door geboorte en inzettende tandenwisseling en waarin over het geheel de vitale krachten een dominerende rol spelen, is de aanvankelijke pure drang tot het vat krijgen op de omringende wereld voor ieder die een baby gadeslaat duidelijk. Ook het eigen lichaam is vooralsnog onderdeel van die wereld. De onvermoeibare pogingen de bewegingen van dat lichaam onder controle te krijgen, de onmiddellijke uitingen van lust en onlust en de begerigheid waarmee zintuiglijke indrukken worden opgezogen en verwerkt, zijn hier uitingen van. Met de verwerving van het lopen, het spreken en het associatieve denken komt deze eerste veroveringsfase tot een zekere afronding. Het kind is dan twee à drie jaar.

Men zou zich kunnen voorstellen dat op dit punt een soort omkering plaatsvindt en de tot dan toe aan de omgeving ontwikkelde vermogens op die omgeving gericht worden om daar doelbewust op in te werken. Van nature gebeurt dat echter nog niet. Er treedt eerst een soort tussenfase op, waarin de nu beschikbare vermogens als het ware in zichzelf gecultiveerd worden, zonder dat dat het karakter van een op resultaat gerichte praktische toepassing heeft. Dit uit zich in het spel. Het spelende kind beleeft en hanteert de wereld zoals zijn scheppende fantasie

hem ingeeft, een wereld waarin de uiterlijke grenzen met het grootste gemak overschreden worden. De vreugdebeleving die hiermee gepaard gaat vormt de bodem voor het later differentiërende gevoelsleven.

Tegen het vijfde jaar komt hierin verandering. Het kinderspel beweegt zich niet meer alleen op de stroom van de fantasie, maar krijgt een doelstellingselement. Met wat gedaan wordt, wordt iets beoogd en de gebruikte attributen moeten gelijkenis met de realiteit vertonen. De fantasie wordt nu ingezet als vindingrijkheid om wegen tot het gestelde doel te vinden. Het kind gaat zich een taak stellen en oplossingen bedenken voor de problemen die zich voordoen. Daarbij ervaart het de beperktheid van zijn kunnen. Het roept de volwassene te hulp die zoveel meer kan en uit de eerbiedsverhouding die daaruit ontstaat groeit geleidelijk aan het verlangen zelf ook meer te kunnen. Het kind is schoolrijp geworden en staat op de drempel van een nieuwe levensfase.

Deze tweede levensfase beslaat de periode tussen tandenwisseling en puberteit; hij is globaal te rekenen van 7 tot 14 jaar. Het begin ervan wordt weer gekenmerkt door een sterke drang de wereld te leren kennen: het beginnende schoolkind heeft een haast onverzadigbare wil tot leren en zuigt wat zich als leerstof aandient in zich op. Daarbij vormen zich al doende tal van vaardigheden, maar wordt tegelijkertijd een wereld van nieuwe denkbeelden opgebouwd. Hoe sterker het beeldkarakter van de leerstof, des te dieper kan de betekenis ervan opgenomen worden en verankerd in het zieleleven, dat deze hele periode bijzonder ontvankelijk is.

Ook nu treedt, vanaf het 9e à 10e jaar, de behoefte tot verinnerlijking op. Op deze leeftijd is de periode van de spontane leergierigheid voorbij, het schoolkind is zich sterker van zichzelf bewust geworden en voelt zich niet meer vanzelfsprekend één met de wereld: buiten en binnen worden duidelijk onderscheiden. Als leerstof komt in aanmerking datgene wat in die binnenwereld opgenomen en daar tot belevenis kan worden. De kunst, niet als manifestatie van de cultuur, maar als een alles doordringend element waaraan het besef van schoonheid kan ontwaken, is daarbij de grote helper.

Met het twaalfde jaar verschuift de aandacht weer meer naar de buitenwereld. De gevormde en doorleefde denkbeelden moeten daarin werkzaam kunnen zijn. De interesse in de natuur, de samenleving en hoe de dingen werken wordt steeds groter en daarmee de zin voor experimenteren en organiseren. Op een nog kinderlijke manier wordt getracht het wereldbeeld in de praktijk vorm te geven.

De inslag van de puberteit omstreeks het 14e jaar brengt dit wereldbeeld aan het wankelen. De veranderingen die met de lichamelijke rijping gepaard gaan roepen zoveel onzekerheid op, dat de wereld op-

nieuw veroverd moet worden. En wel door de chaos van verschijnselen in logische samenhangen te ordenen en zodoende te leren doorzien. De eerste tijd van deze derde zevenjaarsperiode, waarin de menselijke geest ten volle ontwaakt, is gekenmerkt door het streven het analytische vermogen zover op te voeren, dat maximale helderheid ontstaat. Dan pas is het mogelijk weer zoveel zelfvertrouwen op te bouwen, dat de basis voor een nieuw zelfbewustzijn aanwezig is.

Voordat dit zelfbewustzijn zover gerijpt is, dat de jonge mens van daaruit handelend in de wereld kan ingrijpen, heeft dit nog een verinnerlijking in het gevoelsleven. Die ontstaat doordat uit het gevoel van eenzaamheid en teruggeworpen zijn op zichzelf de behoefte voortkomt tot ontmoeting. In deze fase, tussen ongeveer 16 en 18 jaar, wordt het sociale leven voor het eerst gevoed uit interesse in de persoonlijkheid van de medemens. Aan wat daarin ervaren wordt ontvonken de idealen, waarmee de jonge mens de wereld ingaat.

De schooltijd is voorbij. Het laatste deel van deze derde levensfase speelt zich af in een grote verscheidenheid van situaties, waarin eerste maatschappelijke doelen gerealiseerd worden en de grondslag wordt gelegd voor het latere beroepsleven. Met het 21e jaar is dan het punt bereikt waarop de mens de verantwoordelijkheid voor zijn toekomst zelf volledig op zich neemt.

Het feit dat het geschetste driefasige proces driemaal doorlopen wordt en voor de volwassenwording dus drie opeenvolgende niveaus veroverd moeten worden, hangt samen met de gelaagde wezensstructuur van de mens. Aan de mens, zoals hij nu is, zijn vier lagen te onderscheiden:

- het stoffelijke fysieke lichaam, dat uiterlijk waarneembaar is en deel uitmaakt van de fysiek-materiële wereld; de mens heeft dit fysieke lichaam met dier, plant en mineraal gemeen;
- het ether- of levenslichaam, dat drager is van de levensprocessen die bron zijn van groei en ontwikkeling en de stof in organische samenhang brengen; het etherlichaam heeft de mens met dier en plant gemeen;
- het astrale of gewaarwordingslichaam, dat drager is van de bewustzijnsprocessen die gepaard gaan met pijn en welbehagen en bron zijn van gevoelens en verlangens; de mens heeft dit met het dier gemeen;
- het ik-lichaam, dat drager is van het zelfbewustzijn, het vermogen tot innerlijke reflexie van de gewaarwordingen, waardoor keuze en sturing mogelijk worden; dit ik-lichaam bezit alleen de mens.

In de mens vormen deze vier "lichamen" of wezensdelen een samenhangend complex. De onderlinge verhoudingen zijn aan voortduren-

de verandering onderhevig en zijn bepalend voor de bewustzijnstoestand waarin de mens verkeert. Zo treedt de slaaptoestand in, wanneer ik en astraal lichaam zich losmaken van ether- en fysiek lichaam; maakt ook het etherlichaam zich van het fysieke lichaam los, dan treedt de dood in. Bij de geboorte van de mens verbinden etherlichaam, astraal lichaam en ik zich tijdens de embryonale fase successievelijk met de fysieke mensenkern.

Zoals echter voor de geboorte het fysieke lichaam van de mens nog omhuld is door het lichaam van de moeder, zo zijn ook de hogere lichamen aanvankelijk ingebed in respectievelijk een etherische, astrale en ik-omhulling. En zoals op het moment van de geboorte het fysieke lichaam uit de stoffelijke omhulling van het moederlichaam treedt en daardoor rechtstreeks onderhevig wordt aan de inwerkingen van de fysieke wereld, zo treden ook etherlichaam, astraal lichaam en ik achtereenvolgens uit hun beschermende omhullingen en gaan als zelfstandige wezensdelen functioneren. Deze drie volgende "geboortes" vinden plaats op 7-, 14- en 21-jarige leeftijd.

Tot aan de volwassenheid heeft men dus met vier wezenlijk verschillende situaties te maken. Ten eerste de tijd van de embryonale ontwikkeling; hierin rijpt het fysieke lichaam onder beschermende condities zover, dat het vrij kan gaan functioneren. Ten tweede de periode tussen fysieke geboorte en tandenwisseling; hierin komt het etherlichaam, dat nog beschermd aan de groeiprocessen van het fysieke lichaam werkt, zover tot rijping, dat het zelfstandig kan worden. Ten derde de periode tussen tandenwisseling en geslachtsrijpheid; hierin rijpt het nog beschermde astraallichaam, dat op zijn beurt het etherlichaam verder vormt, zo ver, dat het vrij kan komen van zijn omhulling. En tenslotte de periode tussen geslachtsrijpheid en volwassenheid, waarin het nog beschermde ik vormend inwerkt op het astrale lichaam en tot rijping komt, zodat het met het 21e jaar "geboren" kan worden.

Voor de opvoeding heeft dit vergaande consequenties. Zoals het embryo het best gedijt, wanneer men de fysieke omhulling van het moederlichaam niet aantast maar verzorgt en sterkt, zo gedijt het jonge kind het best, wanneer men de omhulling van zijn etherlichaam niet vroegtijdig laat verschrallen, maar juist voeding geeft. Dit bereikt men door als volwassene zijn eigen etherische vormkrachten in te zetten in de vorming van een goed fysiek milieu, waaraan het kind door zijn nabootsingskracht gezonde fysieke lichaamsorganen kan ontwikkelen. In de periode tussen tandenwisseling en geslachtsrijpheid komt het in de opvoeding erop aan, de astrale omhulling intact te laten en te sterken, zodat het astrale lichaam van het kind de tijd heeft om te rijpen. Dat kan men als opvoeder bewerkstelligen door uit zijn eigen astrale krachten zo'n kleurige

beeldenrijkdom voor het kind te scheppen, dat het die vol bewondering in zich opneemt en zodoende een gezond en soepel etherlichaam ontwikkelt. In de derde zevenjaarsperiode gaat het erom de ik-omhulling nog te respecteren en niet vroegtijdig de jonge mens op zijn nog rijpende ik-kracht aan te spreken. Dat betekent voor de leraar de opgave om vanuit zijn eigen ik-kracht heldere, moreel zuivere bewustzijnsinhouden aan te bieden, die bij de leerlingen idealen wekken en zuiverend op hun astrale lichamen werken.

Zijn zo door de opvoeder door inzet van zijn eigen etherische, astrale en ik-krachten de voorwaarden geschapen voor een gezonde ontwikkeling bij het kind van fysiek, ether- en astraallichaam, dan is daarmee de basis gelegd waarop de volwassen geworden mens zijn ik zelf verder kan ontplooiën en aan de samenleving dienstbaar maken.

De hierboven beschreven weg van geboorte tot volwassenheid is in zekere zin een ideaal-beeld. Daarmee wil gezegd worden, dat hij de natuurlijke basis vormt voor de menswording die, naarmate er in de werkelijkheid meer naar wordt gehandeld, tot een meer harmonische ontwikkeling zal leiden. In de werkelijkheid doen zich echter ook gebeurtenissen voor, die de harmonische ontwikkeling verstoren of doorkruisen. Zulke verstoringen richten schade aan, maar kunnen tegelijkertijd een belangrijke functie hebben in de gang van de individuele mens of zelfs van de mensheid als geheel. Het is als met een ziekte of een ongeluk, die in eerste instantie als ongewenste ingreep in het leven ervaren worden, maar waaruit ook nieuwe mogelijkheden kunnen ontstaan.

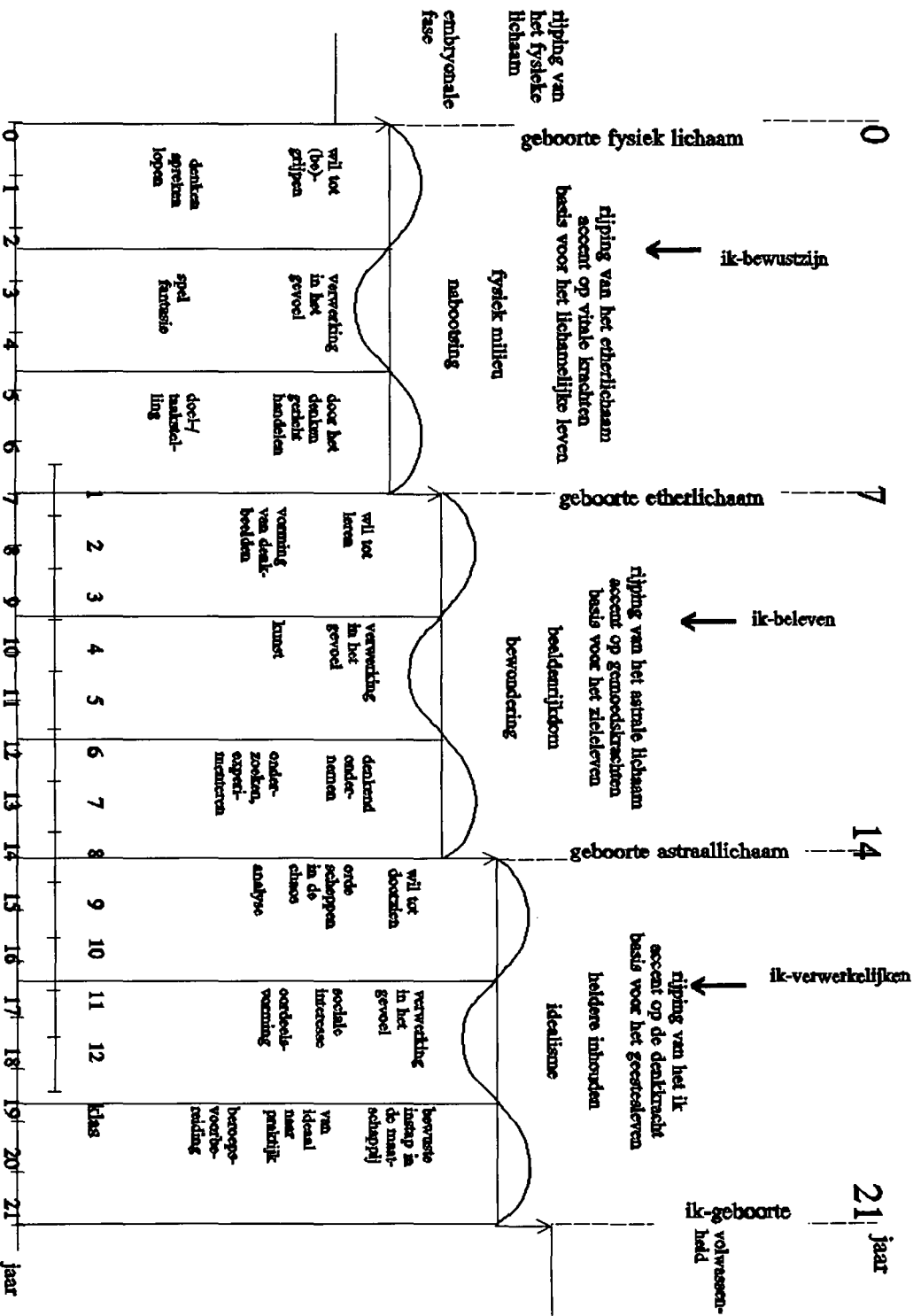
Als doorkruising van de natuurlijke ontwikkeling kan men de inslag van het ik-bewustzijn beschouwen die optreedt tussen twee en drie jaar. Het is het moment waarop een kind voor het eerst "ik" gaat zeggen. Men zou verwachten, dat het ik-bewustzijn pas ontwaakt, als tegen het 21e jaar het ik-lichaam volledig gerijpt is en zich van zijn omhulling ontdoet. In plaats daarvan ligt dit ontwakingsmoment ver daarvoor. Het veroorzaakt een soort schok in de nog geheel naïeve bewustzijnstoestand van de ziel, die reageert met een afweergebaar: de bekende "nee-" of koppigheidsperiode. Het is de eerste uiting van verzet tegen de wereld, het begin van een afsnoering van de kosmische totaliteit, die voorwaarde is voor de menselijke vrijheid.

Het ontwaken van het ik-bewustzijn komt in de tweede en derde levensperiode in gemetamorfoseerde vorm terug. Omstreeks het 9e à 10e jaar verdiept het zich tot een ik-beleven, waarin de breuk met de omringende wereld nog sterker ervaren wordt en zelfs tot crisisverschijnselen kan leiden. Als met 16 à 17 jaar het tijdens de puberteit gehavende zelfvertrouwen weer enigszins herwonnen is, treedt de behoefte aan ik-

verwerkelijking op. De ervaring daartoe het richtsnoer nog niet te hebben en als Parcival door de wereld te moeten dwalen op zoek naar de eigen lotsbestemming, is oorzaak van een diep eenzaamheidsgevoel en werpt de jonge mens nogmaals terug op zichzelf.

Ook hiermee dient de pedagogie rekening te houden. Ten eerste door de verschijnselen serieus te nemen in het besef, dat zonder afzondering het ik niet tot zelfstandigheid kan komen. Ten tweede door in de crisismomenten de liefde tot het kinderwezen richtsnoer voor het handelen te laten zijn.

Met deze beschouwing zij aan de grondslagen van het Vrije Schoolonderwijs voldoende recht gedaan. Als hulp voor het hiernavolgende zijn de voornaamste elementen in onderstaand schema samengevat.



HET LEERPLAN NATUURKUNDE IN DE VRIJE SCHOOL

Opvoeding en onderwijs werken het vruchtbaarst, wanneer zo goed mogelijk wordt ingespeeld op de actuele ontwikkelingsbehoeften van de kinderen. Om aan die behoeften tegemoet te komen heeft de pedagoog inzicht nodig in de betreffende leeftijdsfase, en wel zo, dat hij dat inzicht in de praktijk van het lesgeven voortdurend op de levende realiteit kan afstemmen. Dat maakt pedagogie tot een kunst; het materiaal dat daarbij gebruikt wordt is de leerstof. In de Vrije School dient de leerstof daarom primair de algemene vorming van de leerlingen, en dat in de ruimste zin van het woord. Dat de keuze van de leerstof tegelijkertijd aansluit bij de culturele verworvenheden van de tijd en in de overdracht daarvan een rol speelt, spreekt vanzelf, maar is ondergeschikt aan het ontwikkelingsdoel.

Evenmin als het mensbeeld in het onderwijs als een schema gehanteerd kan worden, maar steeds met de werkelijkheid in verband moet staan, zomin kan de leerstof in een geprogrammeerde vorm worden vastgelegd. Een leerplan heeft dan ook slechts in zoverre betekenis, dat het een algemeen raamwerk geeft van vakgebieden en thema's die voor bepaalde leeftijden van belang zijn. De daadwerkelijke uitwerking en vormgeving vindt telkens opnieuw in de lespraktijk plaats. In die zin geldt, dat iedere leraar steeds weer opnieuw het wiel moet uitvinden. De daarbij opgebrachte inspanning en creativiteit maakt de leerstof pedagogisch werkzaam. Dat neemt niet weg, dat een raamwerk-leerplan als houvast en wegwijzer een uiterst behulpzame en structurerende functie vervult, zolang het niet als voorschrift maar als inspiratiebron wordt opgevat. Ten aanzien van het Vrije Schoolleerplan gelden dus de volgende uitgangspunten:

- de leerstof is geen doel in zichzelf, maar ondersteunt de natuurlijke ontwikkeling van de opgroeiende mens;
- elk vakgebied draagt het zijne bij aan de harmonische en volledige ontplooiing;
- de leraar heeft de vrijheid en de opgave om in het kader van het gemeenschappelijke leerplanraamwerk de stof zo te hanteren, dat deze pedagogisch werkzaam wordt.

Naast de stofkeuze is de wijze van behandelen van minstens even groot belang. Behalve de inhoud als zodanig is het immers de presentatie en de verwerking ervan die de werkzaamheid bepaalt. Slechts een relatief klein deel van alle vakinhouden wordt omgezet in blijvende parate kennis; het overgrote deel heeft de functie de toegang te openen tot een bepaald

levensgebied, daar interesse voor te wekken en primaire vaardigheden in te ontwikkelen. De belangstelling voor de wereld, de wil daarin te werken en het vermogen daar gedachten over te vormen worden gewekt door de gekozen leerstofinhoud in adequate werkvormen te gieten.

Toegepast op het natuurkunde-onderwijs leidt bovenstaande tot de volgende vragen:

1. Wat kan het vak natuurkunde bieden als specifieke bijdrage aan de algemene ontwikkeling van de leerling?
2. Welke leerstofinhoud leent zich daarbij in het bijzonder voor de diverse leeftijdsfasen?
3. Welke werkvormen en didactische principes zijn daarbij vruchtbaar?

Deze vragen zullen in dit hoofdstuk in grote lijn beantwoord worden, waarbij de natuurkunde geplaatst wordt tegen de achtergrond van de leerplanthema's in het algemeen. Die antwoorden hebben niet de pretentie eigen vindingen te zijn van de auteurs; ze zijn te beschouwen als een samenvatting van door de praktijk gegroeide ervaringen steunend op de leerplanaanwijzingen van Rudolf Steiner. In de volgende hoofdstukken zal op de methodische aspecten van het natuurkunde-onderwijs enerzijds en anderzijds op de leerstofinhoud voor een bepaalde leeftijdsgroep, namelijk de 9e klas, meer gedetailleerd worden ingegaan.

In de fysica gaat het erom de verschijnselen op het fysieke plan in hun werkingen, wetmatigheden en onderlinge betrekkingen te leren kennen en doorzien; vervolgens kan die kennis leiden tot doelgerichte benutting van de natuurkrachten in technische toepassingen. Natuurkunde in het onderwijs heeft dus daar een vormende waarde, waar belangstelling voor de fysieke wereld gewekt en gevoed kan worden en waar de uiteenzetting van de mens met de krachten van de levenloze natuur belevingen oproept die tot handelen en bezinning aanleiding geven. Om op zo'n manier met natuurverschijnselen te kunnen omgaan moet een kind al een zekere distantie tot zijn omgeving kunnen nemen, moet het de dingen kunnen bekijken zonder er zich onmiddellijk mee te vereenzelvigen en moet er bovendien een zekere lust tot experimenteren en redeneren in hem leven, waaraan zijn interesse tot verder onderzoek ontvlamt. Die voorwaarden zijn vervuld omstreeks het 12e levensjaar. De natuurkunde doet dan ook zijn intrede in de 6e klas van de Vrije School; in alle daaropvolgende leerjaren t/m de 12e klas blijft hij deel uitmaken van de leerstof.

Dit tijdstip waarop de natuurkunde als vak in het leerplan verschijnt, valt ongeveer samen met de inzet van de derde fase van de tweede zevenjaarsperiode (zie hoofdstuk 1). Die fase waarin, na de eerste leerdrang van het jonge schoolkind en de verinnerlijking van de opgenomen beelden, de blik weer meer naar buiten gericht wordt en de behoefte

ontstaat vanuit een praktisch denken de wereld in al zijn concreetheid te verkennen. Niet voor niets wordt in de 6e klas de Romeinse geschiedenis met zijn sterk op de buitenwereld gerichte inslag als thema gehanteerd dat de kleur van het jaar bepaalt, komen handel en verkeer aan de orde met hun praktische uitwerking in handelscorrespondentie en handelsrekenen en wordt van daaruit de eerste stap naar de algebra gezet. In deze sfeer past ook een bewuster onderzoek van die zaken die tot dan toe als vanzelfsprekende gegevens zijn aangenomen: geluiden, licht en schaduw, warmte en zijn werking op de stof, magnetisme, elektriciteit. Na in de voorafgaande jaren door steeds nieuwe toegangspoorten met de volheid van het aardse leven kennis gemaakt te hebben, met de onmiddellijke omgevingswereld van huis, klas, school en stad in de 3e klas, de dierenwereld en het landschap in de 4e klas, de plantenwereld in de 5e klas, wordt in de 6e klas naast de wereld van de gesteenten het fysische verschijnsel als zodanig als leerstof aangereikt. Het fenomeen wordt voor het eerst de uitdaging waaraan de leerling, onder leiding van de leraar, zijn zintuigen zo kan scholen, dat hij al experimenterend de wetmatigheden van de stoffelijke wereld op het spoor komt.

Toch gaat het in dit stadium nog niet om een vergaande analyse, laat staan om een wetenschappelijke theorie die de verschijnselen met behulp van modellen en wiskundige beschrijvingen tracht te ordenen en voor het denken toegankelijk te maken. De leerlingen zijn nog niet de puberteitsdrempel gepasseerd, nog niet in de derde zevenjaarsperiode gekomen, waarin door het aanbieden van heldere inhouden en het appèl op de denkkrachten de basis voor het geestesleven wordt uitgebouwd. In de 6e klas, en ook in de 7e, verkeren ze nog in die levensfase, waarin met name de gemoedskrachten aangesproken moeten worden, waarin het hele onderwijs nog door zijn beeldenrijkdom appelleert aan de verwondering over en de bewondering van wat de wereld aan raadsels te bieden heeft en waarin zodoende aan de gevoelsbasis wordt gebouwd van een zo rijk mogelijk zieleleven. Die grondtoon blijft het uitgangspunt voor de hele onderbouwtijd van de Vrije School, waaronder verstaan wordt de klassen 1 t/m 8.

Nadat in de 6e klas akoestische, licht-, warmte-, magnetische en elektrische verschijnselen in bovenbeschreven zin aan de orde zijn gesteld gedurende een periode van omstreeks vier weken, blijft dit vakgebied het verdere jaar rusten om in de 7e klas weer te worden opgepakt. Deze vorm van periode-onderwijs is kenmerkend voor het Vrije Schoolonderwijs en wordt in alle leerjaren voor die vakken toegepast, die een nieuw gebied willen ontsluiten of daar een stap verder in willen doen. Roostertechnisch houdt het in, dat gedurende een periode van meestal drie of vier weken elke schooldag met een dubbel lesuur in het betreffende vak begint. Op

die manier kan de leerstof van dag tot dag worden opgebouwd en kan, door de intensiteit en continuïteit waarmee eraan gewerkt wordt, in korte tijd een grote diepte en een sterke verbinding bereikt worden. Na afloop van zo'n periode blijft dat vak rusten totdat het in een volgend jaar weer wordt opgepakt. De praktijk wijst uit, dat die rusttijd geenszins verloren tijd is; integendeel, niet alleen is datgene wat aan het vak beleefd is intussen in de ervaringswereld van de leerlingen opgenomen en gerijpt, ook de in het geheugen verankerde kennis blijkt doorgaans verrassend snel weer paraat gemaakt te kunnen worden.

In de natuurkundeperiode in de 7e klas wordt weer het hele scala van fysische verschijnselen onderzocht, maar nu niet meer als een voorzichtig aftasten van het gebied, maar door zich er zelf in te begeven. Het jaarthema in deze klas zijn de ontdekkingsreizen, het binnen de gezichtskring brengen van de verste uithoeken van de wereld door uit te varen en, verouderde visies trotserend en vertrouwend op de eigen overtuiging, met ongelofelijke doorzetting het oosten via het westen te bereiken en daarmee de aarde in zijn bolvorm af te grenzen. In de 7e klas wordt ook de scheikunde geïntroduceerd, waarin de stof karakter krijgt en in zijn verscheidenheid van geaardheden wordt gedifferentieerd. In de handvaardigheidslessen wordt onder andere bewegend speelgoed gemaakt, een eerste doelbewuste toepassing van mechanische krachten. De mechanica is ook het gebied waarmee de natuurkunde in deze klas wordt uitgebreid. Het krachtenspel van katrollen, takels, hefbomen en tandraden wordt niet alleen beschreven, maar ook aan den lijve ervaren. De leerlingen worden uitgedaagd proeven te doen met hijsen, trekken, winden, de principes van de krachtoverbrenging doelbewust te hanteren en evenwichtssituaties te bepalen. Ook kan door het vervaardigen van een camera obscura of een hete luchtballon een natuurverschijnsel tot concreet apparaat worden verdicht. Daarbij blijft de verwondering als benaderingswijze gehandhaafd en wordt tevens de eigen verwoording van de waarnemingen door proefbeschrijvingen geoefend.

De 8e klas vormt de overgang van onderbouw naar bovenbouw. De stormachtige processen die gepaard gaan met de lichamelijke rijping markeren het einde van de kindertijd en de intredende jeugdfase. Innerlijke onzekerheid drukt zich uit in uiterlijke chaos; tegenstrijdige gevoelens vechten om de voorrang: enerzijds verzet tegen de gevestigde orde, anderzijds behoefte aan houvast. Als het kan gaat de klasseleraar uit de onderbouw nog met de klas mee, maar daarnaast doet een toenemend aantal vakleraren uit de bovenbouw zijn intrede. De leerstof speelt in op de situatie: in tal van vakken komen onderwerpen aan bod die "standvastig" zijn, zoals bijvoorbeeld in de biologie het skelet, of bij taal en wiskunde grammatica en algebra, waarvan de regels niet vatbaar zijn voor

menselijke luimen. Maar tevens is er sprake van veel beweging: de diversiteit van de volkeren wordt behandeld, de uitwisseling van producten over de hele wereld, de verwerking ervan met machines, de ommekeer in die verwerkingsprocessen en in de sociale verhoudingen die de industriële revolutie teweeg heeft gebracht.

In de natuurkunde komen opnieuw akoestiek, optica, warmte, elektriciteit, magnetisme en mechanica, met een accent op hydro- en aërodynamica, aan de orde. Niet in grote lijnen, maar in heel concrete situaties, waarin de mens geconfronteerd wordt met de natuurkrachten van aarde, water, lucht en vuur en die onder controle probeert te krijgen. Door het zelf doen wordt die worsteling voor de leerlingen beleefbaar; biografieën van uitvinders sluiten daarbij aan. Zo kan het beleven van het vacuüm vergezeld gaan met de levensbeschrijving van Otto van Guericke of de ervaring hoe de hoge druk in de ketel de stoommachine in werking zet met de biografie van James Watt. Het zelf oprichten van een waterbarometer van 10 meter hoogte maakt de atmosferische druk van de dampkring tot realiteit, de "schokkende" ervaring van een elektriseermachine het op- en ontladen van voorwerpen beleefbaar. Naast het onderzoeken van de verschijnselen is er nu dus een sterke gerichtheid op het benutten en beheersen van de krachten in technische toepassingen: de sirene, de bril, de camera, de luchtballon, de batterij, de telegraaf, de elektromotor, de hydraulische pers kunnen als voorbeelden daarvan ten tonele gevoerd worden.

Belangrijk is dat de lesstof van de 8e klas een goede afsluiting vormt van de eerste drie leerjaren waarin de natuurkunde gegeven wordt. De lessituatie in al deze drie onderbouwklassen wordt gekenmerkt door een belevend vertellen, door het oproepen van verwondering bij het aanschouwen van de verschijnselen en door een activeren van de wil in het beschrijvend en tekenend weergeven van de uitgevoerde proeven. Daarbij wordt van jaar tot jaar een stap dieper in de materie gezet en de confrontatie ermee steeds existentiëler. Als geheel blijft primair het aanspreken van de gemoedskrachten door een sterk kwalitatieve benaderingswijze, teneinde het rijpende astrale lichaam tot instrument van een rijk zieleleven te vormen.

In de 9e klas, de leerlingen worden in de loop van dit schooljaar 15 jaar, komen ook de laatsten definitief in hun puberteit. Het bewustzijn van de scheiding tussen de eigen individualiteit en de ander is nu pijnlijk scherp: "Jullie weten ook niet wie ik ben, jullie begrijpen me niet." De puber begrijpt zichzelf niet en tracht zijn zelfbeeld te ontleen aan de spiegeling van zijn medeleerlingen. Extremer nog dan in het jaar daarvoor wordt gekozen voor zelfbescherming door introvertie of juist een over-

trokken zich manifesteren. Beide zijn een uiting van de behoefte aan duidelijkheid, aan opheldering van de eigen levenssituatie. De wil tot werkelijk doorzien van de dingen en tot het vormen van een zelfstandig oordeel breekt baan.

Met het ingaan van deze nieuwe levensfase van de leerlingen, hun derde zevenjaarsperiode, wordt in het onderwijs het accent verlegd van het beeldend-kwalitatieve naar het wetenschappelijk-exacte. Beeldenrijkdom wordt opgevolgd door heldere denk- en begripsinhouden. De cognitieve ontwikkeling is nu zover, dat de analyse van gecompliceerdere problemen aangepakt en de stap van verschijnselen naar begrippen bewust gemaakt kan worden. Daaraan wordt het redeneringsvermogen getoetst en verder ontwikkeld en de basis gelegd voor een zelfstandig oordeelsvermogen. De hele stijl van lesgeven verandert: niet alleen wordt de eigen inbreng van de leerlingen gestimuleerd en de maatschappelijke relevantie van de behandelde thema's meer expliciet, ook de onderlinge verhoudingen wijzigen principieel, doordat niet langer de klasseleraar de spil van alles is, maar de leerlingen te maken krijgen met een veelheid van vakleraren, ieder met zijn specifieke aard en kundigheid, waartoe heel diverse betrekkingen mogelijk zijn. Het sociale veld wordt veelkleuriger en appelleert sterker aan het bewustzijn en de eigen keuze; daarbij kan de heterogeniteit van de klas als groep benut worden om sociale vaardigheden te oefenen.

De veranderde situatie leidt ertoe in de 9e klas niet meer het hele natuurkundige veld integraal te behandelen, maar de keuze te beperken tot enkele onderdelen en daar nu dieper op in te gaan. Criteria om die keuze te bepalen zijn: de mogelijkheid om aan de hand van waarnemingsreeksen tot begripsvorming te komen, de mogelijkheid om ontdekte wetmatigheden in eenvoudige formules kwantitatief vast te leggen, de aansluiting bij de eigen zielegesteldheid van de leerlingen. De thema's warmte en elektriciteit blijken hieraan goed te voldoen. Ze bergen enerzijds een vorm van polariteit in zich, die objectief een beeld geeft van de in het ontwakende astrale lichaam beleefde spanning tussen begeerten en idealen. Aan de andere kant bieden deze thema's heel wat ruimte voor verwerking in praktische technische toepassingen (hogedrukpan, geiser, koelkast, turbine, verbrandingsmotor, telefoon, dynamo, transformator, bobine) en kunnen de relatief eenvoudige verbanden van de gaswetten en de Wet van Ohm via begrippen als druk, volume, spanning en weerstand uit de beschikbare fenomenen worden afgeleid. Voor een goede opbouw van de periode is een tijdsduur van vier weken wenselijk, waarvan in de regel de eerste drie weken meer uitvoerig aan de warmteleer en de vierde week aan de beginselen van de elektriciteitsleer worden besteed.

Ook in de volgende bovenbouwklassen blijft het principe gehandhaafd, dat in elke natuurkundeperiode een bepaald gebied verder wordt uitgediept. In de 10e klas, waarin de heftige woelingen van de puberteitsinslag wat tot bedaren komen en het zelfgevoel van de leerlingen weer enige stabiliteit begint te krijgen, geeft nader onderzoek van het gebied van de mechanica de gelegenheid de natuurverschijnselen nog verder voor het exacte denken doorzichtig te maken en in wiskundige vorm te beschrijven. Het principe van de causaliteit brengt de begripsvorming op een hoger abstractie-niveau en levert een verdere ordening in de ervaringswereld; het feit dat de natuurlijke realiteit spoort met de wetmatigheden van de wiskunde verbaast en bevredigt tegelijkertijd. De beheersing van de materie door het denken geeft steun aan het zelfbewustzijn.

In de 10e klasperiode staan daarom kinematica, statica en dynamica op het programma, enerzijds uit te werken in de trillingsleer en de akoestiek, anderzijds in de aansluitende onderwerpen van vermogen, arbeid, energie. Ook kan de bewegingsleer in samenhang met de astronomie worden behandeld. Waar zinvol worden toepassingen in de behandeling betrokken.

Zoals de klassen 6, 7 en 8 wat de aanpak van het natuurkunde-onderwijs betreft een bepaalde samenhang vertonen, - alle onderwerpen komen aan bod, de presentatie is gericht op een belevend kennismaken door waarnemen, verwonderen en beschrijven - zo laten ook de klassen 9 en 10 een gemeenschappelijke kenmerkende benadering zien: door middel van het exacte denken worden de losse waarnemingen tot begrippen samengevat en de technologie vormt een belangrijk aspect. In de klassen 11 en 12 wordt een nieuwe stap gezet: de onderzoeksmethode als zodanig komt naar voren en wordt deel van de beschouwing, die daarmee een kritisch-filosofisch element krijgt. Niet alleen gaat het er meer om de verschijnselen in logische verbanden te plaatsen en zo de wetten op het spoor te komen waaraan ze gehoorzamen, ook de wisselwerking tussen waarnemen en denken, de invloed van de proefopstelling op de resultaten, het hanteren van denkmodellen enerzijds en de fenomenologie anderzijds, het zoeken naar de gestiek van de natuurfenomenen en naar hun wezen krijgen gewicht en brengen de natuurkunde op een diepere laag. Dit in overeenstemming met de verdieping die het zieleleven in deze jaren ondergaat, waarin het nog beschermde maar rijpende ik van de leerling zich met innerlijke ernst en sociale bewogenheid met wereld en medemens verbindt.

De thema's die zich voor een dergelijke behandeling goed lenen zijn elektromagnetisme, kernfysica en de licht- en kleurenleer. De eerste twee worden gewoonlijk in de 11e klas behandeld, de laatste in de 12e

klas. Bij de beschouwing van de elektromagnetische verschijnselen in klas 11 kan aangeknoopt worden bij wat daar in de 9e klas reeds aan grondslagen voor is gelegd. Met een korte herhaling van een aantal proeven kunnen de basisbegrippen van spanning, weerstand en ontlading worden geactualiseerd en uitgebreid met het veldbegrip. De elektrodynamica in vaste geleiders kan uitgebreid worden met die in vloeistoffen en gassen, waarbij de elektrolyse (kan ook bij de scheikunde behandeld worden) en de verschijnselen in de gasontladingsbuis binnen de gezichtskring komen. De stap naar de radio-actieve straling ligt dan in het verlengde; de vraag naar het wezen van de materie en naar de samenhang tussen materie en straling vloeit daar weer als vanzelf uit voort. De verschillende wegen die de moderne fysica tracht te gaan om op deze vraag een antwoord te vinden kunnen, inclusief hun perspectieven en hun beperkingen, met de leerlingen besproken worden.

De 12e klas, het afsluitende leerjaar van de Vrije School, staat voor een belangrijk deel in het teken van de grote overzichten en samenhangen. Of dat nu in de geschiedenis, de literatuur of de wetenschap is, overall, in elk vak zijn aangrijpingspunten te vinden om het specifieke onderwerp dat behandeld wordt in groter verband te plaatsen. Zo kunnen in de natuurkunde in samenhang met de behandeling van de lichtverschijnselen de historische gang van de natuurwetenschap, de wetenschapsfilosofie of meer in het bijzonder de opvattingen van Huygens, Newton en Goethe ten aanzien van de kleurfenomenen naar voren komen. Kleurenleer, beeldvorming bij prisma's, lenzen en spiegels, spectroscopie, buiging, interferentie en polarisatie vormen thema's van de periode, eventueel aangevuld met toepassingsgebieden als verlichtingstechniek en fotografie. Ook kan teruggekomen worden op de problematiek van materie en straling en getracht worden het wezen van licht en duisternis nader te komen.

Met de 12e klas-periode vindt het natuurkundeleerplan van de Vrije School zijn afronding. Van de eerste kennismaking met dit gebied in de 6e klas tot aan de vragen naar de essentie van de ons omringende natuurverschijnselen voert de weg die in het voorafgaande in grote trekken is beschreven. Die weg begint met een onbevangen, zuiver kwalitatieve waarneming van de verschijnselen, dringt stapsgewijs steeds dieper door in de beheersing ervan, enerzijds door kwantificering, anderzijds door toepassing, om uit te komen op een nieuwe, nu vanuit het denken ondernomen poging de fysieke wereld in zijn kwaliteiten te doorgronden. Steeds staat daarbij de pedagogische doelstelling voorop: de opgroeiende mens door de aangeboden leerstof in zijn ontwikkeling naar de volwassenheid, naar een gezond, geïnteresseerd en geëngageerd in het leven staan te stimuleren. Tegelijkertijd wordt een heleboel geleerd dat later nog prak-

tisch nut kan opleveren of als algemene kennis meegenomen wordt in het leven.

Om dat kenniselement nog in die zin toe te spitsen, dat het voldoet aan gestelde exameneisen, wordt aan de meeste Vrije Scholen na de 12e klas de gelegenheid gegeven aan de leerlingen die dat willen en kunnen zich in een jaar voor te bereiden op het examen havo of vwo. Voor het vak natuurkunde blijkt die termijn te kort te zijn en is het noodzakelijk reeds gedurende de 11e en 12e klas daar in aparte vakuren voorwerk voor te verrichten. Het streven is er daarbij steeds op gericht de in die voorbereidende examentraining aangesneden onderwerpen pas te behandelen nadat ze in de periodes natuurkunde geïntroduceerd zijn.

In het onderstaande overzicht is het leerplan natuurkunde van de Vrije School in de meest gecomprimeerde vorm samengevat.

Klas	Onderwerpen	Methodische kenmerken
6	geluid, licht, warmte, magnetisme, elektriciteit	- beeldend, vertellend
7	idem als in 6 + mechanica	- verwondering wekkend
8	idem als in 7 met accent op hydro- en aërodynamica	- de verschijnselen waarne- mend en beschrijvend
		- kwalitatief gericht
		- verbinding door eigen ervaringen en biografieën van uitvinders
9	warmte, elektromagnetisme	- analyserend
10	kinematica, statica, dyna- mica	- door (causale) verbanden begrippen vormend
		- toepassingen in technologie
11	elektriciteitsleer, radio-activiteit, kernfysica	- de methode als zodanig komt naar voren
12	licht- en kleurenleer	- kritisch-filosofisch
		- zoekend naar het wezenlij- ke van de natuurverschijn- selen

Een nadere, nog schematische specificatie per klas is op de volgende bladzijden gegeven.

Klas 6 tot en met 8

	6e klas	7e klas	8e klas
klankleer akoestiek	sferenharmonie orkest instrumenten toonladder intervallen	de stemvork toon beweging, vibratie	resonantie snelheid van luchtvibraties (Kundt) gaatjes-sirene het luchtledige
licht	licht - donker kleuren kleurencirkel	spiegelbeeld schaduwbeeld beeldvorming (camera obscu- ra, camera lucida)	beeldvorming (camera obscu- ra) spiegels (hol, bol) lenzen (hol, bol) brandpunt bril
warmte	zon - aarde mens - natuur atmosfeer straling warmte uitbrei- ding koken	waarnemen van warmte eigen warmte- organisme uitzetting	uitzetting van . lucht . water . stalen stang (Tyndal) vlam (kaars, brander) stromingen in lucht en in water hete luchtballon kaarsencarroussel dansende water- druppel

	6e klas	7e klas	8e klas
elektrici- teit	elektrisch veld 'de wil om te verdwijnen'	elektrisch gesloten kring 'verzet' (weer- stand) chemische activi- teit spanning	elektrostatische kracht batterij (elektri- citeit door che- misch proces) telegraaf meetinstrument (magnetische kracht) elektromotor
magne- tisme	aardmagne- tisme kompas magnetiet veldbeeld van enkele mag- neet	een magneet breken veldbeelden van meerdere mag- neten	korte herhaling 6/7 gestiek van een magnetisch veld
mecha- nica		balans krachten katrol, takels mechanismen	aërodynamica . atmosferische druk . vacuüm, over- druk . zuigpomp . Torricelli . venturi, vleugel . het weer hydrodynamica . Archimedes . druk en water- diepte . gesloten syste- men, pers . stroming, op- pervlakte, druppel

Klas 9

1. Warmte

- het verbrandingsproces
- vier warmtefenomenen
 - . warmteverbondenheid
 - . warmtestraling
 - . uitzetting
 - . warmtegeleiding/stroming
- aggregatietoestanden/fase-overgangen
 - . eigenschappen van gas-
sen, vloeistoffen en vaste
stoffen
 - . drukafhankelijkheid van
kook- en smeltpunt
 - . gaswetten
 - . absolute temperatuur
 - . kritische druk en tempe-
ratuur
- technische toepassingen
 - . pot van Papin, hogedruk-
pan
 - . stoommachine, turbine
 - . verbrandingsmotor
 - . koelkast, geiser, cv

2. Elektriciteit

- de gesloten elektrische
kring
 - . spanning, warmte, mag-
netisme
 - . wet van Ohm
- inductie
- technische toepassingen
 - . luidspreker, microfoon,
telefoon
 - . dynamo, transformator,
bobine
 - . elektriciteitscentrale

Klas 10

1. Bewegingsleer

- eenparige beweging
- versnelde beweging
 - . vrije val
 - . kogelbaan
- harmonische beweging
 - . slinger
 - . trillingen
 - . geluid
- cirkelbeweging
 - . overbrengingen
 - . omtrekssnelheid

2. Statica

- momentenstelling
- krachten samenstellen en
ontbinden
- bruggen, kranen, overspan-
ningen

3. Dynamica

- vermogen
- arbeid
- energie
- begrip massa
- rotatie

Klas 11

1. Elektriciteit/magnetisme
 - statische elektriciteit
 - . veldbegrip
 - . vonken
 - . zender
 - dynamische elektriciteit
 - . motor
 - . dynamo
 - . transformator
 - . LC-kring, zender
 - elektriciteit in vloeistoffen
 - . elektrolyse
 - elektriciteit in gassen
 - . oscilloscoop, televisie
 - . radiobuis, tl-verlichting
2. Radio-activiteit
 - natuurlijke radio-activiteit
 - . aards, atmosferisch
 - . α -, β -, γ -straling
 - kunstmatige radio-activiteit
 - . isotopen
 - technische toepassingen
 - . kerncentrale
 - . kernwapens
 - . medische apparatuur
 - maatschappelijke betekenis
3. Wetenschapsmethodiek

Klas 12

1. Optica en kleurenleer
 - beeldvorming
 - . schaduw
 - . spiegels
 - . lenzen
 - . prisma
 - kleurenleer
 - . hemelkleuren
 - . prismatische kleuren
 - . Goethe- en Newtonkleuren
 - . nabeelden
 - . kleurencirkel
 - spectroscopie
 - buiging
 - . interferentie
 - polarisatie
 - lampen
 - . tl
 - . natriumlamp
 - . laser
 - fotografie, kleuren-t.v.
2. Wetenschapsfilosofie
 - Locke, Hume, Berkeley
 - Huygens, Newton, Goethe

FENOMENOLOGIE EN HET ONDERWIJS

3.1 Inleiding

De natuurkundelessen in de Vrije School worden vanuit een andere wetenschapsopvatting gegeven, dan de gangbare. Zoals in paragraaf 3.2 zal worden uitgewerkt kijkt men in het Vrije Schoolonderwijs kritisch naar het modellen denken dat binnen de gangbare wetenschap gebruikelijk is. Men kiest ervoor de lesstof op Goetheanistische fenomenologische wijze aan te bieden. De lesstof omvat de meeste gebieden van de moderne fysica. In de hogere klassen wordt de gangbare verklarende methode vergeleken met de fenomenologische.

Beide vormen van wetenschap trachten een verbinding tot stand te brengen tussen theorie en empirie; denken en waarnemen zijn de pijlers van onze kennis. De manier waarop de verbinding tussen waarnemen en denken wordt gezocht is voor de gangbare wetenschap een andere dan voor de Goetheanistische fenomenologie. In de volgende paragraaf (3.2) behandelen we eerst de gangbare wetenschappelijke methode, met enige kennistheoretische toelichting. Dan volgt een kritische beschouwing, om duidelijk te maken waarom de Vrije School het onderwijs vanuit een andere wetenschappelijke optiek wil vormgeven. Vervolgens geven we in paragraaf 3.3 een beschrijving van de Goetheanistische fenomenologische methode, toegelicht met voorbeelden. Tenslotte volgt in paragraaf 3.4 een toelichting hoe men deze fenomenologische methode in lesverband kan hanteren. Dit zal worden uitgesplitst naar de verschillende leerjaren.

3.2 De gangbare wetenschap en het modellen denken

Sinds 1600 heeft de gangbare wetenschap een geweldige ontwikkeling doorgemaakt. In de 17e eeuw werd binnen de sterrenkunde en de mechanica een wetenschappelijke methode ontwikkeld, die aanvankelijk zo succesvol bleek, dat zij zou leiden tot de ontwikkeling van velerlei andere disciplines. Vooral in de laatste eeuw tenslotte mondde kennis uit in technische toepassing, die het dagelijkse leven totaal veranderde. Tevens openbaarden zich nu desastreuze gevolgen van deze methode op natuurwetenschappelijk, psychologisch en sociologisch gebied.

Galileï (1564-1642) is wellicht de belangrijkste toonzetter van deze methode geweest. Hij spiegelt de mensheid het ideaal voor om alle kennis

in wiskundige vorm te gieten. Want, aldus Galileï, 'het boek der natuur is in wiskundige taal geschreven.' Zo komt hij tot de uitspraak, het latere parool van de gangbare wetenschap: 'Meet alles wat meetbaar is en maak meetbaar wat zich nog aan het meten onttrekt!'

Door metingen aan rollende kogels langs een schuine helling kwam Galileï tot het bewijs, dat bij vallende voorwerpen de afgelegde weg evenredig is aan het kwadraat van de valtijd. Zo ontstond één der eerste formules, een wiskundig verband, dat de wetmatigheden van een natuurverschijnsel weergeeft: Galileï's ideaal. Door zo de nadruk op het meten te leggen trad Galileï in het voetspoor van Democrit (470-360 v.C.). Feitelijk maakte hij diens scheiding tussen primaire en secundaire zintuigkwaliteiten als eerste praktisch. Immers, Democrit huldigde de mening dat primaire gewaarwordingen als gewicht, vorm en beweging een objectief karakter hebben, terwijl secundaire gewaarwordingen zoals kleur, toon, reuk en smaak door de mens gevormde illusies zijn.* Later gaf Locke (1632-1704) een filosofische fundering van deze begrippen. Overigens moet hierbij worden aangetekend dat Democrit geen materialist in de huidige betekenis was. Zijn begrip van atomen was nog bezield en meer te begrijpen als monade, in de betekenis die Leibniz (1646-1716) aan dit woord gaf: een krachtcentrum dat de werking van een wezen openbaart. Het materialisme ontstaat pas als wetenschappers zich enerzijds alleen richten op de meetbare feiten, terwijl anderzijds gewerkt wordt vanuit de gedachte dat natuurlijke verschijnselen door louter stoffelijke krachten worden veroorzaakt. Dit paradigma van de gangbare wetenschap wordt onder meer verwoord in de eed die W. Brücke en E. Du Bois-Raymond elkaar in 1842 zwoeren, namelijk 'om geen andere krachten dan de algemeen fysisch-chemische in een organisme als werkzaam te veronderstellen.'

Wetenschappers na Galileï ontdekken later, dat kennis over natuurverschijnselen niet altijd in de vorm van een wiskundig verband kan worden gegoten. Zo ontstaat in de 18e eeuw naast de wiskundige formulering het verklaringsmodel. Een vroeg voorbeeld van zo'n model is al te vinden bij Newton (1642-1727), namelijk in zijn stelling, dat wit licht bestaat uit een aantal kleuren, die in een prisma in verschillende mate breken, zodat zij uitwaaiëren in een spectrum. Het atoommodel in zijn verschillende stadia van ontwikkeling is wel het meest bekende en belangrijkste voorbeeld van een verklaringsmodel. Een model wordt steeds als hypothese ontwikkeld uit analyse en meting van een verschijnsel. In de

* De visie van Goethe en Steiner op deze begrippen komt in paragraaf 3.3 aan de orde.

loop van de eeuwen ontstond hierbij de volgende werkwijze, hier stapsgewijze beschreven:

1. Probleembeschrijving. Een verschijnsel wordt grondig bestudeerd. Na een eerste analyse tracht men tot een probleemstelling te komen.
2. Beeldvorming. Factoren, die het verschijnsel kunnen beïnvloeden worden meetbaar gemaakt, evenals de invloed ervan op het verschijnsel.
3. Model. Een wiskundig verklaringsmodel wordt als hypothese opgesteld, zodanig dat dit model overeenkomt met de metingen.
4. Toetsing. Op grond van het model worden berekeningen gemaakt, die moeten voorspellen hoe het verschijnsel zich in bepaalde omstandigheden zal gedragen. Experimenten wijzen uit of deze voorspellingen kloppen.

Een aldus ontwikkeld model kan in de loop van de tijd nog verdere aanpassingen ondergaan, als verschijnselen worden onderzocht die eerder nog buiten het gezichtsveld bleven. Zo ontstaat dan een model dat een groter aantal verschijnselen kan verklaren en beschrijven. Iets dergelijks heeft gedurende de ontwikkeling van het atoommodel meerdere malen plaatsgevonden, zodat dit model in zijn huidige vorm een zeer groot aantal verschijnselen kan verklaren en beschrijven.

De hiervoor beschreven werkwijze wordt wel de *realistische natuurwetenschappelijke methode* genoemd, waar onder meer N. Bohr (1885-1962) een voorstander van was. Deze methode gaat er van uit dat het opstellen van modellen noodzakelijk is, maar dat hierbij wel moet worden aangeknoopt bij de werkelijkheid. Bohr zag modellen als tijdelijke beschrijving van de werkelijkheid. Bij de *positivistische natuurwetenschappelijke methode* gaat men uit van een bedacht model, dat men vervolgens toetst aan het verschijnsel. De werkwijze is daarbij als volgt:

1. Probleemstelling. Men kiest een verschijnsel dat men bestuderen wil.
2. Model. Op grond van literatuurstudie en theoretische overweging stelt men een verklaringsmodel op.
3. Experiment. Men ontwerpt experimenten die het model op zijn waarde kunnen toetsen.
4. Toetsing. Men gaat na of de meetresultaten overeenstemmen met de modelberekeningen.

A. Einstein (1879-1955) hanteerde deze methode. Hij volgde een wiskundige werkwijze en stelde axioma's en grondregels op. Overigens zijn beide methodes, zowel de realistische als de positivistische, modelmatig en materialistisch. Wel staat de positivistische natuurwetenschappelijke methode verder af van het experiment dan de realistische, omdat dat alleen nog dient ter verificatie van de theorie.

Tot zover de beschrijving in kort bestek van de gangbare wetenschappelijke methode. Binnen de Vrije School wordt in het algemeen vrij kritisch tegen deze vorm van wetenschap aangekeken. Deze kritiek spitst zich toe op drie aspecten:

1. het reduceren van de waarneming tot registratieprodukten in de vorm van meten, wegen en tellen;
2. het materialistische uitgangspunt;
3. het modelmatige denken.

Deze drie aspecten hangen samen met het nominalisme. In de middeleeuwen werd een existentiële strijd gevoerd tussen de stromingen van het nominalisme en het realisme. Volgens de laatste zijn gedachten en ideeën reële kwaliteiten, die de mens denkend aan de wereld afleest, terwijl de nominalisten van mening waren dat ideeën menselijke produkten zijn, naar vorm en inhoud: het zijn slechts woorden. Toen de nominalisten aan invloed wonnen, ging men de secundaire zintuigindrukken steeds meer als illusies zien: de enige werkelijkheid achter de klank zag men in de fysieke - en dus tastbare - trillingen van materialen in de omgeving. Maar daarmee reduceerde men de natuur tegelijkertijd tot een puur stoffelijke aangelegenheid. Terwijl binnen de visie van het realisme nog plaats was voor niet-stoffelijke oorzaken achter de verschijnselen, ontstaat met de opkomst van de nominalisten ook het materialisme. I. Kant (1724-1804) was van mening dat de mens dermate aan zijn eigen voorstellingen gebonden is, dat hij het verschijnsel buiten zich nooit kan kennen. Een dergelijke visie vat A. Schopenhauer samen in zijn stelling: 'de wereld is mijn voorstelling'. Een groter isolement ten opzichte van de natuur en de medemens is nauwelijks denkbaar. Sinds het einde van de vorige eeuw plukken we de wrange vruchten van deze eenzijdige denkwijze. Op wereldschaal vindt er uitbuiting plaats, zowel ten opzichte van de natuur als de medemens. In 1955 ondertekenden 18 nobelprijswinnaars een tekst, met daarin de volgende uitspraak: 'met vreugde hebben wij ons in dienst van de wetenschap gesteld, omdat ze een weg is tot een gelukkig leven voor de mensheid. Wij zien echter met schrik om het hart dat juist deze wetenschap de mensheid de middelen verschaft om zichzelf te vernietigen.'

In 1936 schreef de wetenschapper E. Minkowski: 'Het proza van de wetenschap is een verminken van de werkelijkheid. De dichterlijkheid van de wereld is geen toevoegsel, maar duidt op het wezenlijke van de wereld.' Doordat het zicht op het wezenlijke in de natuur op den duur verloren ging, raakte de mens in een isolement ten opzichte van de wijsheidsvolle ordening die in de natuur heerst en die voor de mens vooral zichtbaar wordt, als hij zich richt op dit wezenlijke. En zo werd de

mens een in technische zin vaardige, maar in morele zin onvolwaardige schepper van ons hedendaagse leefmilieu, met al zijn pro's en contra's.

Overigens wordt het probleem van de eenzijdigheid van de moderne wetenschap door steeds meer mensen tot op zekere hoogte onderkend. Men gaat daarbij echter in overgrote meerderheid niet zo ver, de methode als zodanig ter discussie te stellen. Men tracht de genoemde eenzijdigheid op andere wijze het hoofd te bieden. Interdisciplinaire samenwerking kan bijvoorbeeld in het teken worden gezien van het streven om tot een totaalvisie te komen, door aan zoveel mogelijk factoren voldoende gewicht te geven. Hier zal echter een kritischer standpunt worden ingenomen. De consequentie is dat voor een andere vorm van wetenschap wordt gekozen. Deze zal in de volgende paragraaf worden behandeld.

3.3 Goetheanistische fenomenologie

Goetheanistische fenomenologie voert terug op het werk van Goethe (1749-1832), maar heeft later aansluiting gevonden bij twee stromingen die beide na Goethe zijn ontstaan: fenomenologie en holisme.

In de fenomenologie tracht men een verschijnsel te leren waarnemen, zoals het is. Vervolgens tracht men in het verschijnsel het wezen ervan te aanschouwen, de zogenaamde wezensschouw. Grondlegger van de fenomenologie is Edmund Husserl (1859-1938) geweest, die voortbouwde op het werk van F. Brentano (1838-1917).

De fenomenologie heeft vooral binnen wetenschappelijke disciplines als psychologie en geschiedenis aanhang gevonden. De Goetheanistische fenomenologie sluit hier in zoverre op aan, dat zij het fenomeen tracht te lezen als de verschijning van het wezen achter het verschijnsel. Goethe spreekt in dit verband van de 'idee' in het verschijnsel. Vanuit filosofisch oogpunt gezien grijpt Goethe hiermee terug op Aristoteles (384-322 v.Chr.). Diens voorganger Plato (427-347 v.Chr.) zocht de idee, het ware wezen van een verschijnsel *achter* de verschijning. Hij achtte de ideeën als zodanig van veel grotere waarde dan de wereld van de verschijnselen, die in zijn ogen slechts de schaduwzijde van de werkelijkheid was. Aristoteles zocht de werkzaamheid van de idee *in* de verschijning en zag idee en verschijning als gelijkwaardig.

Goetheanistische fenomenologie sluit ook aan op een stroming, die deze eeuw vooral in de laatste decennia is opgekomen, het holisme. In het holisme gaat men er van uit dat binnen een groep van verschijnselen de som der delen groter is dan de delen apart, zodat de enkele delen alleen vanuit het geheel kunnen worden begrepen. Binnen het gebied van de anorganische natuur was Goethe van mening dat men moest zoeken naar

dat fenomeen, dat een heel gebied van verschijnselen in één verschijnsel samenvat, waardoor de essentie hieruit oplicht, het oer-fenomeen. Heeft men binnen een gebied van verschijnselen het oerfenomeen of de oerfenomenen gevonden, dan eerst doorziet men ook samengestelde fenomenen.

Cruciaal voor de fenomenologische methode is het standpunt dat Goethe inneemt tegenover Locke's stellingname, dat primaire gewaarwordingen wel en secundaire niet objectief zouden zijn. Deze kwestie lost Goethe op door te stellen dat 'het niet onze zintuigen zijn die ons bedriegen, maar ons oordeel.' Als verschillende aspecten van de wereld via andere wegen bij ons binnen komen, dan is het aan het oordeelsvermogen van de mens de juiste plaats van deze aspecten te bepalen. In zijn boek *Der Entstehungsmoment der Naturwissenschaft in der Weltgeschichte* stelt Rudolf Steiner dat er een onderscheid moet worden gemaakt tussen het gewaarwordingsproces en het begrip van de gewaarwording dat ontstaat. Ten aanzien van de primaire kwaliteiten stelt Steiner dat de gewaarwording ervan bewust door de ziel wordt beleefd, terwijl het begrip dat men zich naar aanleiding van deze gewaarwording vormt onbewust buiten het lichaam wordt geprojecteerd. Als voorbeeld noemt Steiner de waarneming van een plaats in de ruimte. Aan de basis van de gewaarwording van deze plaats in de ruimte staat ons lichaam met zijn ruimtelijke richtingen onderboven, links-rechts, voor-achter. Hoever een voorwerp zich vóór, links en boven mij bevindt relateer ik aan mijn eigen lichaamsassen. Het wiskundige beeld dat ik gebruik, het cartiaanse assenstelsel, is een *onbewuste* projectie van mijn lichamelijke gestel, terwijl de afstandbepalingen *bewust* plaatsvinden.

Bij de secundaire waarneming ligt de situatie geheel anders. De secundaire kwaliteiten klank, kleur, warmte, enz., zijn imponderabele, niet-stoffelijke krachten, die volgens Steiner geen door de menselijke ziel geschapen illusies zijn, maar deel uitmaken van de wereld buiten de mens. Trilling en klank maken beide deel uit van de realiteit en kunnen beide door de mens worden waargenomen, maar langs verschillende wegen, die we kortweg de primaire respectievelijk de secundaire waarneming noemen. Terwijl nu de waarneming van primaire kwaliteiten bewust plaats vindt en het begrip van de waarneming onbewust buiten het lichaam worden geprojecteerd, vindt dit op tegenovergestelde wijze plaats bij de secundaire waarneming. Daar is juist de gewaarwording onbewust, terwijl het tot begrip worden van deze gewaarwordingen bewust plaatsvindt. Zo beleven wij onbewust diepte in de kleur blauw. Deze gewaarwording vindt weliswaar in onbewuste regionen van de ziel plaats, maar worden wij ons dromerig bewust in het gevoel. Door het gevoelsleven te scholen, kunnen wij leren dergelijke gewaarwordingen bewuster te beleven, zodat ook een duidelijk onderscheid kan worden gemaakt met gevoelens die uit

onze subjectiviteit voortkomen. Zodra we ons een begrip vormen van de diepte in de kleur blauw kan ons op voorstellingsniveau de twijfel bekrui-
pen: heeft blauw diepte, of plakken wij dit begrip erop vanuit onze
ervaring met de ruimtelijkheid van de blauwe hemel? Goethe stelt: de
zintuigen bedriegen niet, maar ons oordeel. Wel moet worden aangete-
kend dat ten aanzien van de secundaire gewaarwordingen scholing van het
gevoelsleven noodzakelijk is, zodat de gewaarwordingen bewust kunnen
worden gemaakt en worden onderscheiden van onze eigen subjectiviteit.

Het is de verdienste van Rudolf Steiner geweest dat hij Goethe's
wetenschappelijk werk van een filosofisch fundament heeft voorzien.*

De Goetheanistische fenomenologische methode ten aanzien van de
anorganische natuur zal nu in een aantal stappen omschreven worden.

1. Waarneming. Het waarnemen is steeds weer de toegangspoort tot de
wereld. De fenomenen moeten zo gevarieerd en veelzijdig mogelijk
worden waargenomen. De grondstemming is verbazing, verwonde-
ring. Men leeft in en met de waarneming en dat gedurende langere
tijd. Men tracht zich één te voelen met het fenomeen zonder het te
doorzien. De waarnemingsoordelen moeten zo zuiver mogelijk onder
woorden worden gebracht, terwijl alle subjectieve gevoelens en de
reeds verworven gezichtspunten (vooroordelen) terug worden gehou-
den. De exacte waarneming moet worden geschoold, door telkens een
exacte herinnering van het verschijnsel op te bouwen en dit te verge-
lijken met het fenomeen zelf. Het verschijnsel zelf moet de maatstaf
vormen hoe gevarieerd of uitgebreid het moet worden waargenomen.
Houdt men zich bijvoorbeeld bezig met het verschijnsel uitzetting,
dan beperkt men zich er niet toe alleen de mate van uitzetting van
stoffen te meten. Ook kwalitatieve veranderingen treden op bij
verhitting van een stof. De stof wordt zachter, laat zich makkelijker
met andere stoffen vermengen (vloeistof). Maar ook bij het smelten
en het verdampen van stoffen treedt uitzetting op, terwijl daarnaast in
het oog springende kwalitatieve veranderingen optreden. Al deze
facetten dienen steeds opnieuw te worden waargenomen.
2. Naast de natuurlijke fenomenen, die elke mens gewaar kan worden,
kan men ook zoeken naar proefopstellingen, die bepaalde facetten van
het te onderzoeken fenomeen nog duidelijker aan het licht brengen.
Dit noemt Goethe de wetenschappelijke fenomenen. De proef is de
ware bemiddelaar tussen de denkende mens en de objectieve, aan
voorwaarden gebonden natuur. In de eerste fase van het onderzoek

* Rudolf Steiner: *Grundlinien einer Erkenntnistheorie der goetheschen Weltanschauung*.

staat de waarneming van de natuurlijke fenomenen nog voorop. In de tweede fase neemt het inzicht in de fenomenen toe en is de onderzoeker in staat proefopstellingen te ontwerpen, waarin de voorwaarden waaronder het fenomeen zich voordoet duidelijker onderscheiden worden. Men tracht het verschijnsel te zien als een dynamisch proces, waarin men oorzaak - in de zin van voorwaarden - en gevolg kan onderscheiden. Eerbied en vreugde voor het proces dat men gewaar wordt is de juiste grondstemming in deze fase van het onderzoek, zodat men innerlijk in beweging komt en de dynamiek van het proces ook beleeft. Bij het 'voorwaardelijke' denken dat men beoefent is het nodig zich met fantasie in te leven in het verschijnsel. Goethe spreekt in dit verband van 'exakte sinnliche Phantasie'. Overziet men bijvoorbeeld het hele proces van verhitten van een vaste stof, smelten, verhitten als vloeistof, verdampen en verhitten als gas, dan kan men de samenhang gaan zien tussen de grote uitzetting van gassen en de elasticiteit van het volume, naast de geringe uitzetting van vaste stoffen, die kwa volume vormstar zijn. Leeft men zich met exacte fantasie in in dit verschijnsel, dan kan het beeld ontstaan van de warmte als 'kracht', die de stof wil oplossen, verdunnen, wil laten uitdijen.

3. Al doende wordt in de veelheid van fenomenen naar de meest elementaire waarneming of proefopstelling gezocht. Het eindresultaat is een verschijnsel dat als 'oerfenomeen' voor dat gebied van fenomenen kan worden aangeduid. Een 'oerfenomeen' is een door het denken geïsoleerd verschijnsel, dat ten volle in de waarnemingswereld zichtbaar is. Het is het gebaar dat alle verschijnselen doortrekt. Uitgaande van de oerfenomenen zijn verschillende verschijnselen te ordenen. Men doorziet een complex van verschijnselen, omdat de oerfenomenen er in zichtbaar zijn. De samenhang met de totaliteit is daarmee gegeven. Denkend is men tevreden, omdat het afzonderlijke fenomeen in een grotere samenhang is opgenomen. Door nu het onderzochte verschijnsel in samenhang te brengen met andere, verwante fenomenen, gaat dit oerfenomeen, het grondgebaar dat bij dit verschijnsel hoort, zich nog duidelijker aftekenen. Zo kan men de warmte, als perifeergerichte tendens, vergelijken met de gravitatie, die juist naar het centrum gericht is. Het gebaar van de warmte is oplossen, uitdijen, zó, dat de stof een eenheid gaat vormen in het gas, terwijl het gebaar van de gravitatie verdichten, verstarren is, zó dat de stof in aparte eenheden uiteen valt. De vaste stof, met name het kristal, is hiervan het resultaat. (Zie hoofdstuk 4, paragraaf 5.) De grondstemming van deze fase in het onderzoek is een koesteren van de voorstellingen en een zich in wijsheidsvolle harmonie voelen met de wereld. Het is verder in deze

fase heel belangrijk ideeën terug te houden, tot de gebarentaal van het verschijnsel zelf spreken gaat. Goethe noemt dit de fase van de resignatie.

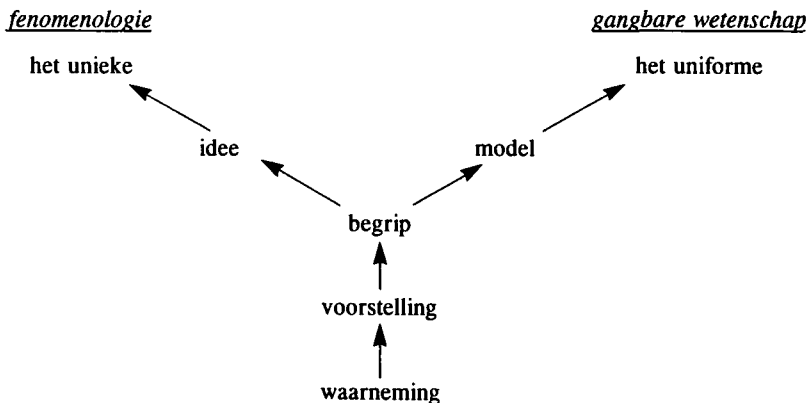
4. In de laatste fase van het onderzoek tracht men te komen tot een ontmoeting met het wezen van het verschijnsel, met het karakter ervan en de dynamiek van de natuurkracht waar het hier om gaat. Het denken dat zich leent voor deze wezensontmoeting noemt Goethe 'anschauende Urteilkraft', aanschouwend denken. Het is voor deze fase van groot belang te kunnen wachten met overgave en berusting en de vraagpijn naar het wezen te weerstaan. Wat deze fase oplevert laat zich nauwelijks kort verwoorden. Men bereikt een mate van zich één voelen met het verschijnsel die daarvoor ondenkbaar was. Het geheel kan als volgt worden samengevat:

	Voelen	Waarnemen	Denken
1.	- Verbazing, verwondering. - Alleen wat men lief heeft leert men kennen (Plato).	- Ruimtebeeld: . Natuurfenomeen. . Wetenschappelijk fenomeen.	- Waarnemingsoordelen.
2.	- Eerbied - Vreugde	- Procesbeelden, tijdsvoorstellingen. - Exakte sinnliche Phantasie (Goethe).	- Relaties, causale begrippen. - 'Voorwaardelijk' denken.
3.	- Koesteren van voorstellingen. - Zich in wijsheidsvolle harmonie voelen met de wereld.	- Doorleefde voorstellingen.	- Resignatie van ideeën. - Gebarentaal, gestiek, oerfenomeen.
4.	- Overgave, berusting. - Vraagpijn naar het wezen weerstaan.	- De waarneming openbaart zijn geheimen, spreekt zich in mij uit.	- Wezensontmoeting, idee. - Aanschouwend denken.

Overzien we deze vier stappen, dan valt op dat we ons als mens steeds diepgaander met het fenomeen verbinden, in die zin, dat we stap voor stap vanuit een steeds diepere laag van onze ziel de bewuste ontmoeting met het verschijnsel zoeken. Allereerst zijn we denkend-waarnemend bezig. In innerlijk opzicht is dit met name een hoofdgebeuren. Vervolgens worden we denkend-voelend actief: een hoofd-hart aangelegenheid. Dan trachten we ons door denken én nadoen met het fenomeen te verbinden: een activiteit die zich afspeelt tussen hoofd en wil. Het vierde stadium levert tenslotte een ontmoeting op tussen 'de hele mens' en het wezen in het verschijnsel.

Natuurlijk moet men zich het hele proces niet zo geordend voorstellen als het hier beschreven wordt, al kan men naderhand, terugkijkend, wel een dergelijke ordening zien in het onderzoek. Tijdens het proces zelf pendelt men veeleer tussen stap 1 en 2, soms maakt men een vordering die met stap 3 te maken heeft, dan pendelt men weer tussen stap 1 en 2, steeds maar weer opnieuw, enz. Het hele proces neemt, zoals elk wetenschappelijk onderzoek, veel tijd in beslag.

Vergelijken we tot slot de gangbare met de fenomenologische methode, dan valt op dat in beide vormen van onderzoek in eerste instantie gelijke wegen bewandeld worden. Op grond van de waarneming vormt men zich een voorstelling, die men door middel van begrippen in een samenhang tracht te zien. Op dit punt gaan de wegen uiteen. De gangbare wetenschap wil de verschijningswereld zoveel mogelijk onder een gelijke noemer brengen. Daarom wordt op grond van het gevormde begrip naar een modelmatige verklaring gezocht, die met de veelheid van verschijnselen overeenkomt. De fenomenologie tracht elk verschijnsel als uniek te zien, met een eigen plaats in het geheel van verschijnselen. Zij zoekt naar het idee dat in de verschijning werkzaam is en overstijgt hiermee het begripsmatige niveau. In schema:



3.4 Fenomenologie in de lespraktijk

3.4.1 Inleiding

De in de voorafgaande paragraaf gegeven beschrijving van de fenomenologische methode is bedoeld voor docenten en kan natuurlijk niet direct worden toegepast in de lessituatie. In de hoogste leerjaren, klas 11 en 12, is het mogelijk om de fenomenologische methode expliciet te behandelen, naast de gangbare wetenschappelijke methodes. Dat is in eerdere leerjaren natuurlijk niet mogelijk: daar werkt de fenomenologische aanpak veeleer impliciet door in de manier waarop met proeven wordt omgegaan en de wijze waarop naar inzicht in de verschijnselen wordt gezocht. Voor alle leerjaren heeft Rudolf Steiner een bepaalde opbouw gegeven, waarin een onderwerp kan worden behandeld. Door deze opbouw in de les te hanteren wordt het fenomenologische karakter ervan versterkt en in goede banen geleid. Deze wijze van behandeling houdt rekening met dag- en nachtritme en kan daarom alleen in het periodeonderwijs worden gehanteerd (zie hoofdstuk 2).

In de *Ergänzungskurs** stelt Steiner dat elke thematische behandeling drie fasen zou moeten doorlopen. De eerste dag wordt het verschijnsel middels proeven waargenomen. Een goede proef moet het enthousiasme wekken om er verder op in te willen gaan, de leerling moet in hoofd, hart en wil worden aangesproken. Het is nu nog niet de bedoeling tot conclusies ten aanzien van het verschijnsel te komen, alleen de feiten staan op dit moment centraal.

De tweede stap in het proces wordt gemaakt door de leerlingen in de gelegenheid te stellen een eigen voorstelling van de waarneming te vormen. Dit wordt bereikt door de proeven te recapituleren en door het maken van proefverslagen. Dit laatste gebeurt vaak thuis. Met de ervaring van de proef en de voorstelling die men zich ervan gevormd heeft, gaan de leerlingen de nacht in. Tijdens de slaap vindt de verwerking van deze ervaringen plaats, zodat de leerlingen de volgende ochtend de les in komen met duidelijke beelden van het verschijnsel in het hoofd.

Nu kan de derde stap in het proces plaatsvinden. Bij de leerlingen is een soort verwachtingsvolle verwarring ontstaan, die er om vraagt door begrip en inzicht doorzichtig te worden gemaakt. Afhankelijk van de leeftijd kan dit gebeuren door te vergelijken, analogieën te trekken, of meer begripsmatig dan wel beschouwend op het fenomeen in te gaan.

* Rudolf Steiner: *Menschenkenntnis und Unterrichtsgestaltung*. Vertaling: *Menskunde en opvoeding*.

Overzien we dit proces dan merken we dat de leerling zich eerst naar buiten richt in het waarnemen. Daarna wordt het waargenomene mee naar binnen genomen en verinnerlijkt. Het beschouwen, dat de volgende dag plaatsvindt, is geen verdere stap naar binnen. Veeleer brengen de gedachten die ontwikkeld worden de leerlingen weer terug in de wereld, omdat de samenhang met andere verschijnselen nu beter begrepen wordt. Het proces kan dus als een kringloop worden gezien, van buiten naar binnen en weer naar buiten gaand, waarbij het fenomeen een soort opstanding moet ondergaan, in die zin, dat in het denken een nieuw begrip voor het verschijnsel ontstaat.

Het hele proces kan ook in samenhang gebracht worden met de drieslag van ziele-impulsen, die in hoofdstuk 1 beschreven werd. Elk zieleproces doorloopt drie fasen.

1. Eerst ontstaat een vanuit de wil opstijgende drang tot begrijpen. Deze eerste fase treedt ook op bij het waarnemen van een proef. Het waarnemen is in eerste instantie een wilsaangelegenheid, het is de handelingspool van het zenuw-zintuigstelsel. Bij het ervaren van het fenomeen ontwaakt de drang om het waargenomene te begrijpen.
2. De tweede zielebeweging is gericht op een meer gevoelsmatige verinnerlijking van wat in de buitenwereld werd ervaren. Deze fase vinden we terug in het recapituleren en verwerken van de proef.
3. In de derde fase ontstaat de impuls om vanuit heldere gedachten tot handelen te komen. Deze laatste zielebeweging vinden we terug in het beschouwen van een proef. Niet alleen dienen heldere gedachten geformuleerd te worden, het zo ontstane inzicht maakt het ook mogelijk de eigen handelingen naar de gevonden wetmatigheden te richten.

In de volgende paragrafen zullen de drie hiervoor beschreven stappen nader worden toegelicht.

3.4.2 Het experiment

Zoals in de vorige paragraaf is uiteengezet dient een proef hoofd, hart en wil aan te spreken. Verbazing, beleving en enthousiasme moeten worden gewekt. Daarvoor is het onder meer nodig, en dit geldt zeker voor de klassen 6, 7 en 8, dat de proeven groot genoeg worden uitgevoerd. Het gebruik van eenvoudige materialen maakt een proef toegankelijker. Bijvoorbeeld een zelfgeconstrueerde, opengewerkte, elektromotor van 30 cm doorsnee, waarbij spoelen en magneten worden gebruikt die de leerlingen al kennen van eerdere proeven, maakt dat de leerlingen over de

drempel heenstappen van het gevoel: 'Dat is toch te ingewikkeld voor mij.' De leerlingen kunnen vaak worden uitgenodigd om dichterbij te komen. Belangrijk is voor rust en concentratie te zorgen. Met tact kan een sfeer van verwachting worden geschapen, zonder daarbij te appelleren aan het gevoel van sensatie, dat teveel een buitenkant-beleven oproept. Sommige proeven kunnen door de leerlingen zelf worden uitgevoerd, iets wat de betrokkenheid en de zelfstandige verwerking kan verhogen. Bij andere proeven is het echter nodig om als docent te helpen kijken naar een proef: zulke proeven kunnen beter als demonstratieproef worden uitgevoerd. Ook kan men in een 'socratisch' vraag-en-antwoord spel de leerlingen suggesties laten doen hoe een proef kan worden aangepakt. Wat zou de slingertijd van een slinger allemaal kunnen beïnvloeden en hoe en in welke volgorde kunnen we dit onderzoeken?

Als een nieuw thema wordt opgestart, dan is het vaak goed te beginnen met een ervaringsreeks* van kleine proefjes. Dit is een zodanig opgebouwde reeks proefjes, dat de leerlingen een eerste ervaring met het fenomeen in kwestie kunnen opdoen. Zo kan men bijvoorbeeld eerst de proef van Franklin met de nodige variatie doen (zie 4.3.2) en pas later meer expliciet onderzoeken hoe kookpunt en druk samenhangen. Wil men een proevenreeks zó opzetten, dat daaruit een bepaald leereffect ontstaat, dan kan men een zogenaamde waarnemingsreeks* samenstellen. Dit is een reeks proefjes die zó zijn samengesteld en die in zo'n volgorde worden getoond, dat daaruit een bepaald begrip of idee kan worden ontwikkeld. Wil men bijvoorbeeld het begrip temperatuur behandelen, dan kan men beginnen met aan te tonen dat binnen één aggregatietoestand de stof gelijkmatig uitzet (dit kan kwalitatief door bijvoorbeeld een kwikthermometer en een buis met alcohol gelijktijdig te verwarmen). Vervolgens kan men een gas-, vloeistof- en vaste stof-'thermometer' construeren en demonstreren. (Zie 4.3.3, voorbeeld 1).

Het is een belangrijk didactisch gegeven dat het doen van proeven een enthousiasmerende, maar niettemin inspannende bezigheid is. Om goed waar te nemen moeten de leerlingen enerzijds hun aandacht op iets buiten zich richten, een beetje uit zichzelf los komen, anderzijds moet dit met concentratie gebeuren. Men moet uit zichzelf treden en toch gebundeld blijven. Dit vergt veel energie, vandaar dat er per dag maar een beperkt aantal proeven kunnen worden gedaan.

De plaats die het doen van proeven binnen het periodeonderwijs als geheel inneemt verschilt per klas. Er zal hier voor de hogere klassen een

* Zie ook Peter Landweer: *Natuurkunde, proevenmateriaal voor de 6e en 7e klas*.

korte karakteristiek per leerjaar worden gegeven. Voor een meer algemene omschrijving wordt verwezen naar hoofdstuk 2.

Voor de achtste klasser heeft de wereld nog een glans, die gaandeweg verdwijnt. Aan de verschijnselen kunnen nog kwaliteiten worden beleefd. Een proef wordt nog met gretigheid opgezogen en met verbazing en bewondering aanschouwd. De proeven dienen vooral ervaringskarakter te hebben en het verschijnsel kwaliteit te demonstrenen. Laat men bijvoorbeeld wat kaliumpermanganaat in een groot cylinderglas met water zakken, dan wordt het vloeiend-beweeglijke karakter van water goed zichtbaar.

De negende klasser kijkt al met meer afstand naar een proef. Hij ontwikkelt een meer op oorzaak en gevolg gerichte blik en neemt de verschijnselen veel 'kaler' waar. De proeven zelf dienen ook meer dit oorzaak en gevolg karakter te hebben. Waarnemingsreeksen zijn hiervoor vaak het meest aangewezen.

De tiende klasser is pas echt toe aan gericht kwantitatief onderzoek, waar dat in eerdere leerjaren slechts incidenteel plaatsvindt. Het gaat wel steeds om een afgebakend stukje onderzoek, bijvoorbeeld het meten aan de slingerbeweging.

In de elfde klas kan de omvang van het onderzoek groter worden en meer thematisch worden aangepakt. Bijvoorbeeld het gedrag onderzoeken van positieve en negatieve elektriciteit in de verschillende buizen van Crookes.

In de twaalfde klas tenslotte kan een aanvang worden gemaakt om naast het uiterlijk verschijnsel ook de innerlijke beleving bewust waar te nemen. Bijvoorbeeld niet alleen kijken naar de kleur rood, maar ook trachten de gevoelens die door deze kleur worden opgeroepen zo objectief mogelijk waar te nemen.

Tot zover deze korte omschrijving per leerjaar. Steeds komt het er op aan het doen van proeven te laten meegroeien met het ontwikkelingsproces van de leerlingen.

3.4.3 De verwerking van proeven

Zoals eerder werd uiteengezet komt het er bij de verwerking van proeven op aan, dat de leerlingen zich een eigen voorstelling vormen van het waargenomen verschijnsel. Anders gezegd: de waarneming moet bewust worden gemaakt om hem des te beter op te kunnen nemen. Dit houdt niet in dat de leerlingen nu al met allerlei conclusies op de proppen kunnen komen. De reine waarneming wordt uitgespaard. Daarnaast is het in klas acht en negen ook nodig het waarnemingsproces te onderscheiden

van de proefuitvoering. Dit wordt bereikt door de proefbeschrijving in drie delen te splitsen: benodigdheden, uitvoering en waarneming. In latere leerjaren is het onderscheidingsvermogen van de leerlingen al zover ontwikkeld, dat men de splitsing tussen uitvoering en waarneming kan loslaten, zeker waar de proeven gecompliceerder worden. Maar de terughouding van het oordelen wordt de gehele bovenbouw door beoefend.

Het tekenen van de verschijnselen kan zeer bevorderend werken op het waarnemen. Immers, men kan alleen tekenen wat echt goed bekeken is. Het tekenwerk dient dus zo goed mogelijk te gelijken. Maar als elke proef getekend wordt ontstaat al gauw een sleur. Het is bijvoorbeeld beter enkele geschikte proeven uit te kiezen en aan het tekenen daarvan goed aandacht te besteden. In latere leerjaren kan men dan het tekenwerk blijven reserveren voor proeven, waarvan de waarneming rijk geschakeerd is. Bijvoorbeeld de verschijnselen in de buizen van Crookes in de elfde klas. Het tekenwerk kan eventueel in de klas worden gemaakt, zodat men de vraag om herhaling kan honoreren.

Het tijdsproces rond de verwerking van proeven verloopt als volgt. Na een proef te hebben gedaan volgt eerst een recapitulatie van de uitvoering en de waarneming. Daarvoor laat men leerlingen uit de herinnering vertellen. Vervolgens kan een korte tijd worden uitgetrokken voor het maken van aantekeningen. In de achtste klas kan dit recapituleren het beste na elke proef gebeuren. In de hoogste klassen kunnen een aantal verschijnselen tezamen worden nabesproken. Als huiswerk maken de leerlingen dan een proefverslag. Het is goed de leerlingen hierbij zelf een titel te laten bedenken voor deze ene, unieke, proef. In de achtste klas kunnen dat meer beeldende titels zijn, in latere leerjaren dient een titel meer het wezenlijke van de proef aan te duiden.

De volgende dag kan men een proefverslag laten voorlezen. Met name in klas acht en negen kan dan met de klas worden nabesproken of de uitvoering en waarneming goed onderscheiden zijn en of er alleen feiten beschreven zijn. Ook bespreekt men of de beschrijving nog aanvulling behoeft, dan wel te uitvoerig beschreven is. In hogere klassen is de noodzaak proefverslagen in deze zin na te bespreken minder aanwezig en kan men het zwaartepunt verleggen naar de beschouwing.

3.4.4 De beschouwing

Zoals in paragraaf 3.4.1 werd uiteengezet, worden pas een dag nadat een proef wordt uitgevoerd de waargenomen verschijnselen besproken. Binnen de Vrije Schoolpedagogie wordt veel belang gehecht aan de

verwerking die gedurende de nacht plaatsvindt. Juist het periodeonderwijs kan hierop inspelen. In de eerder genoemde Ergänzungskurs legt Steiner uit hoe deze verwerking plaatsvindt. Het kijken naar een proef heeft de hele mens aangesproken, met name zijn de leerlingen wilsmatig aangesproken. Het recapituleren en verwerken van de proef in een proefverslag is een activiteit, die behalve het voorstellingsvermogen vooral ook het ritmische systeem* aanspreekt. Het is een meer innerlijk aftastende bezigheid. Tijdens de slaap stroomt wat zo door de ziel werd opgenomen naar het hoofdsysteem. De leerlingen ontwaken met onbewuste beelden in het hoofd over het de vorige dag waargenomen verschijnsel. Dit zijn nog vrij diffuse voorstellingsbeelden, die bewust moeten worden gemaakt en die doorlicht dienen te worden met heldere gedachten.

Nadat een proefverslag is voorgelezen en besproken gaat de leerkracht met de klas in gesprek. De leerkracht helpt de drang tot begrip te vertalen in concrete vragen, die door het verschijnsel worden opgeroepen. Vanuit deze vraagstelling probeert men dan zo naar het fenomeen te kijken, dat een ordening binnen het verschijnsel zichtbaar wordt. Vervolgens laat de leerkracht de klas formuleren welke kenmerken of wetmatigheden zich binnen het verschijnsel aftekenen. De socratische methode van vraag en antwoord is tijdens het hele proces een bruikbaar hulpmiddel. De aldus gevonden wetmatigheden laten zich vervolgens met tal van zaken verbinden. Dit zal nu per leerjaar nader worden uitgewerkt.

In de achtste klasser werkt de impuls om wat in de ziel werd opgenomen met gedachten te doorlichten om vanuit dit inzicht tot handelen te kunnen komen. Daarbij is het denken van de leerlingen nog niet tot abstractie gekomen. Daarom is het van belang met de leerlingen een beeld te vormen van de verschijnselen in plaats van een abstracte analyse van de wetmatigheden. Deze beelden moeten zich lenen voor vergelijking met andere aspecten van het leven. Bespreekt men bijvoorbeeld het verschil tussen vaste stoffen en gassen, dan kan het beeld ontstaan van de stof in starre, per definitie onmengbare vorm, een wereld van aparte, op zichzelf staande dingen, en de stof in zeer beweeglijke, elastische vorm, waar de stof zo zeer is vermengd, dat zij één geheel vormt. Dit beeld laat zich onder meer met het sociale leven van de mens vergelijken. Men kan de leerlingen een 'vaste stof' mens laten beschrijven: koud, kil en hard, en een 'gas' mens: iemand die sterk in zijn omgeving opgaat en meeleeft met anderen. Dit soort vergelijkingen werken niet alleen verhelderend en verlevendigend, maar geven de leerlingen ook impulsen om mee aan het

* Zie hoofdstuk 1.

werk te kunnen. Zo vormt men uit de verschijnselen gevormde gedachten om tot inzichten, die in het sociale leven behulpzaam kunnen zijn. Ook kan men de vergelijking meer op lichamelijk/praktisch gebied zoeken. Hoe het is om in extreme warmte of koude te leven? Wat betekent koorts voor de mens, wat onderkoeling? IJldromen respectievelijk gevoelens van apathie laten zich dan weer vergelijken met het verschil tussen gas en vaste stof.

Stimulerend op deze leeftijd werkt ook verhalen vertellen, die bij de leerstof aansluiten. Dat betreft nog een heel andere, meer gevoelsmatige laag bij het gebeuren. Bij het genoemde onderwerp over gas en vaste stof sluit bijvoorbeeld een verhaal aan over eskimo's en over de rond de evenaar levende massai. Ook kan men over Scrooge (Dickens) vertellen, om vandaar uit het onderwerp innerlijke warmte te benaderen.

Vanuit de fenomenologische methode gezien is voor de achtste klas vooral de eerste stap van het waarnemen van belang (zie hoofdstuk 3.3). De activiteit van het bewuste, gerichte waarnemen wordt beoefend. Het denken over de verschijnselen is vooral beeldend vanuit een dromend bewustzijn. Vanuit dit beeldvermogen kunnen de leerlingen, op een onbewust niveau, toegang krijgen tot de gebarentaal die in een verschijnsel spreekt. Het is eigenlijk al stap drie van de fenomenologische methode. Zo is bijvoorbeeld het gebaar van het apart op zichzelf staan van de vaste stof tegenover de eenheid in de gaswereld heel herkenbaar voor achtste klas leerlingen.

In de negende en tiende klas verschuift het zwaartepunt van de beschouwingen van beeldvorming naar begripsvorming. De leerlingen komen in een nieuwe leeftijd fase, waarbij in hen de wil ontwaakt om vanuit een meer abstract denken de wereld te begrijpen (zie hoofdstuk 1). Het causale denken wordt voor hen ook een anker van innerlijke zekerheid in het verder turbulente zieleleven dat bij de puber hoort. Men kan de mens op deze leeftijd geen groter onrecht aandoen, dan wanneer men hem louter uitgekauwde abstracties voorschotelt. De begrippen die men de leerlingen aanreikt, zouden naast helder ook 'levend' moeten zijn. Ideaal gesproken zouden zij, eenmaal in het innerlijk van de leerlingen geplant, een leven lang mee moeten kunnen groeien en ontwikkelen. Daarvoor is nodig dat de begrippen zorgvuldig aan de hand van een reeks waarnemingen worden ontwikkeld. Wil men in de negende klas bijvoorbeeld de begrippen spanning en stroom behandelen, dan kan men eerst met behulp van de elektriseermachine laten zien, dat spanning de drang binnen de elektrische toestand is, om het verschil tussen de positieve en negatieve pool te overbruggen en daarmee de elektrische toestand op te heffen. Positieve en negatieve elektriciteit willen letterlijk en figuurlijk 'bij elkaar komen'. Stroom treedt bij de elektriseermachine slechts gedurende het

korte moment van ontlading op en is het effect dat optreedt bij het 'samenkomen' van positieve en negatieve elektriciteit. Bij een batterij kan men bespreken dat deze een constante stroom kan leveren, omdat de elektrische toestand continu even snel wordt opgebouwd als zij door de kring vergaat. Hier is de stroom het magnetische en warmte effect dat in een gesloten kring optreedt. Tenslotte kan men via aanvullende proeven tot de wet van Ohm komen, en deze aldus formuleren:

$$\text{stroom(effect)} = \frac{\text{spanning (wil)}}{\text{weerstand}}$$

De spanning is, zoals uit het eerder beschrevene mag blijken een wil, een drang. De stroom is een magnetisch respectievelijk warmte effect. De weerstand is de 'weerstand' die het geleidende metaal biedt tegen de 'wil' van spanning. Op deze manier formuleert men de wet van Ohm als een variant van een oerwet: overal waar een wil werkt, maar weerstand geboden wordt, is het effect groter naarmate de wil groter is en is het effect kleiner naarmate de weerstand groter is.

Het is bij dit soort beschouwingen nodig dat de leerlingen voldoende de gelegenheid krijgen om zich in de verschijnselen in te leven. Dan kan de spanning in het bovenstaande voorbeeld als wil c.q. wens worden beleefd. Vanuit de fenomenologische methode gezien betekent dit dat naast stap 1, het waarnemen, nu ook stap 2, de exacte zintuiglijke fantasie wordt beoefend (zie paragraaf 3.3). Met de krachten van de fantasie wordt het verschijnsel innerlijk afgetast.

In de tiende klas kan men het denken tot een hogere graad van abstractie voeren. Enerzijds betekent dit dat men voor het eerst formules afleidt en daar vervolgens berekeningen mee maakt, anderzijds wekt men bij de leerlingen begrip voor de niet direct zintuiglijk gegeven samenhang der dingen. Begrippen worden in een samenhang geplaatst. Bij de behandeling van de kogelbaan bijvoorbeeld laat men zien dat de voorwaarts gerichte, eenparige beweging en de verticale valbeweging wel gelijktijdig plaatsvinden, maar toch als van elkaar onafhankelijke bewegingen verlopen. Door de samenstelling van eenparige beweging en eenparig versnelde valbeweging kan men vervolgens laten zien, dat de kogelbaan wiskundig gezien een parabolische vorm heeft. De tiende klasser kan zo tot de verrassende ervaring komen, dat iets wat zich geheel binnen de wiskunde ontwikkeld heeft, nu in de natuur blijkt voor te komen. De studie van de samenhang der verschijnselen is een stap in het denken die met de tweede fase van de fenomenologische methode overeenkomt.

De nu ontwikkelde begrippen kunnen vervolgens worden toegepast. Dit is belangrijk, want daardoor wordt vermeden dat de begrippen abstract blijven, men geeft ze 'handen en voeten'. In de negende klas

wordt deze toepassing in de techniek gezocht, in de tiende klas in het rekenwerk. In de negende klas kan men bijvoorbeeld eerst wisselspanningsverschijnselen behandelen en daarna bekijken hoe in de microfoon geluidstrillingen wisselspanningen teweegbrengen en in de luidspreker omgekeerd. Ook kan men de transformator behandelen. Tenslotte kan men de telefoon behandelen, waarbij men alle verschijnselen en de daaraan ontwikkelde begrippen weer tegenkomt. Door zulke voorbeelden kan de negende klasser beleven, dat wat men met het denken ontwikkelt vervolgens inzicht blijkt te geven in tal van zaken. Dat kan hem dan het gevoel geven innerlijk grond onder de voeten te hebben, wat een basis is voor de ontwikkeling van het zelfbewustzijn.

In de negende klas kan men de lesstof omlijsten met verhalen over de wereld der techniek en bijvoorbeeld een biografie van een uitvinder. In de tiende klas, waar de leerlingen beginnen een eigen wereldbeeld te ontwikkelen, kan men via verhaalstof de revolutie in het wereldbeeld bespreken, die bij de overgang van de middeleeuwen naar de moderne tijd plaatsvond. Men kan bijvoorbeeld het geocentrische wereldbeeld van de oude Grieken behandelen, naast het heliocentrische van Copernicus (1473-1543). Als men er aan de hand van dit soort voorbeelden in slaagt de 'aardverschuiving' op denkgebied in kaart te brengen, die rond de zestienste eeuw plaatsvond, dan sluit men aan bij wat er aan innerlijke veranderingen bij de leerlingen plaatsvindt. Deze verhaalstof staat ook in directe verbinding met het fenomenologisch inleven in verschijnselen. Dit methodische aspect wordt hier genoemd omdat er behalve voor het gevoelsgebied ook voor de ontwikkeling van het denken een stimulans van uitgaat.

In de elfde en twaalfde klas vindt er een verdere verschuiving plaats ten aanzien van het beschouwen. Naast beeld- en begripsvorming treedt nu vooral het zoeken naar meer omvattende gezichtspunten naar voren: ideeënvorming staat centraal. In deze leeftijdphase treedt een periode van verinnerlijking op, waarbij de jonge mens voor diepe levensvragen komt te staan (zie hoofdstuk 1). De elfde klasser worstelt met zijn of haar plaats in het sociale leven. De verdieping die met dit soort vragen en worstelingen gepaard gaat, leidt er toe dat een eerste begin van een levensideaal in de ziel kan oplichten. De beschouwingen kunnen dan ook zeker aan diepte winnen in deze klas, al moet men steeds weer aftasten waar de diepte gezocht moet worden. In de leerlingen ontwaakt, parallel aan de vraag naar de zin van het bestaan en de plaats van het eigen ik, een filosofische interesse. Men kan hierbij aansluiten door de gangbare wetenschap te bespreken en deze ook vanuit een filosofische invalshoek te belichten. Ditzelfde kan men ten aanzien van fenomenologische methode doen. Dit geeft vervolgens de mogelijkheid beide methodes te vergelijken

bij het bestuderen van bepaalde verschijnselen. Zo kan men allerlei verschijnselen op het gebied van elektriciteit en radioactiviteit fenomenologisch behandelen, en vervolgens laat men zien hoe zich op grond van deze verschijnselen het atoommodel ontwikkeld heeft.

Parallel aan de grotere belangstelling voor de andere mens op sociaal gebied ontwaakt bij de elfde klasser ook een diepgaandere interesse voor de 'ontmoeting' met de verschijnselen in de natuur. Bij deze interesse sluit men aan door het karakter en de gebarentaal van de verschijnselen te onderzoeken. Dit houdt in dat men behalve de twee eerste stappen van de fenomenologische methode, nu ook de derde stap tracht te hanteren (zie paragraaf 3.3). Door onderzoek van de elektrische verschijnselen rond kathode en anode in de buizen van Crookes probeert men bijvoorbeeld het gebaar van de positieve en negatieve elektriciteit te ontdekken. Vervolgens kan men de resultaten van gangbare wetenschap en fenomenologie evalueren. Een dergelijke aanpak wekt op een speciale wijze het bewustzijn voor denkprocessen, omdat men zich niet alleen in een bepaalde denktrant begeeft, maar er ook weer afstand van neemt.

In de twaalfde klas kan men iets vergelijkbaars ondernemen ten aanzien van de licht- en kleurverschijnselen. Men kan uitgaande van de verschijnselen een fenomenologische kleurenleer ontwikkelen. Hiertoe heeft Goethe een eerste aanzet gegeven*. Daarnaast kan men de meer gangbare kleurenleer van Newton behandelen. Ook in de twaalfde klas kan men de fenomenologische methode zo nauwgezet mogelijk volgen, met als streven de gebarentaal te leren lezen van het licht, de duisternis** en de verschillende kleuren. Maar terwijl men in de elfde klas het karakter van de verschijnselen alleen in de buitenwereld bestudeert, wordt in de twaalfde klas de blik ook naar binnen gewend. Men tracht bijvoorbeeld de aard van de kleur rood niet alleen aan de hand van proeven te ontdekken, maar men probeert ook, kijkend naar de gevoelens die deze kleur innerlijk oproept, na te gaan welk gebaar de kleur rood innerlijk in ons maakt. Nu kunnen uiterlijk en innerlijk gebaar met elkaar worden vergeleken, ervan uitgaande dat beide door het fenomeen zelf worden gegenereerd. Men kan bijvoorbeeld bij het uiterlijke rood, dat bij zonsop- of -ondergang ontstaat, tot de ontdekking komen dat het licht doordringingskracht ontwikkeld heeft aan de samenballende duisternis. De kwestie kan hier natuurlijk slechts kort worden aangeduid. Als men zich in de kleur rood inleeft ontstaat een overeenkomstige beleving: het doordrin-

* Zie Goethe's *Farbenlehre*.

** Goethe zag duisternis niet louter als afwezigheid van licht, maar als een realiteit op zichzelf.

gende van het rood heeft iets explosiefs, en staat diametraal tegenover het samengebalde aspect ervan.

Het is in de elfde en zeker ook in de twaalfde klas van groot belang de leerlingen in dit soort beschouwingen zo actief mogelijk te laten participeren. De leerkracht beschikt reeds over inzichten, maar in plaats van deze te brengen vestigt hij steeds de aandacht van de leerlingen op bepaalde fenomenen. Langs deze weg kunnen de leerlingen zelf tot ontdekkingen komen en momenten van 'aha-Erlebnis' beleven.

3.4.5 Afronding

Ondanks alles wat hiervoor gezegd is over het toepassen van fenomenologie in de lessituatie, is het duidelijk dat dit niet vergeleken kan worden met wetenschappelijk onderzoek. Een les moet het evenwicht houden tussen een door de leerkracht gestuurde oriëntatie en een ontdekkingsreis in de wereld der verschijnselen. Daarbij kan elke leerkracht dagelijks ervaren, dat de klas als geheel véél wijzer is dan de leerkracht afzonderlijk, ondanks diens opleiding en scholing. De klas kan deze wijsheid echter niet mobiliseren en bundelen, daar moet de leerkracht katalysator en richtpunt voor zijn. Binnen een vak als natuurkunde kan de leerkracht wel een voorbeeld zijn door zijn of haar manier van denken. Is het denken van de leerkracht naast helder ook creatief, heeft het durf en 'Schwung'? Kent het behalve structuur ook nuance?

Het is voor de toekomst van onze cultuur van het allergrootste belang dat er mensen komen, die vanuit eigen creatieve bronnen kunnen werken. Waar het louter examen-gerichte onderwijs in Nederland er blijkbaar op gericht is, leerlingen zo goed mogelijk aan te passen aan de maatschappij, wil Rudolf Steiner een hele andere koers. De jonge mens moet zo worden opgevoed dat de latere volwassene met een innerlijke vrijheid in het leven staat, om vanuit deze vrijheid vernieuwend en inspirerend in de cultuur te kunnen werken*. Voor zover het creatieve denken door natuurwetenschappelijke vakken ontwikkeld wordt, leveren ze een wezenlijke bijdrage aan de vernieuwing van het onderwijs. Misschien kan dit creatieve denken er ook toe bijdragen dat de moderne wetenschapsimpassie, waarvan in paragraaf 3.2 sprake was, tot een oplossing komt.

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

Hoofdstuk 4

WARMTELEER

4.1 Inleiding

In de twee nu volgende hoofdstukken zal nader ingegaan worden op de leerstof van de 9e klas. In deze klas staat de opbouw van begrippen die de verschijnselen in een logische samenhang brengen centraal, evenals de vraag hoe inzichten zijn toegepast in de techniek. Zowel het thema warmte als elektriciteit lenen zich hiervoor en zijn door Rudolf Steiner aangegeven voor de natuurkundeperiode in de negende klas. Beide onderwerpen zijn in eerdere jaren al aan bod geweest. Daarbij ging het in klas 6 om een eerste kennismaking en in klas 7 en 8 om een verdere verkenning van deze omvangrijke gebieden van verschijnselen. In het negende leerjaar komt het thema warmte tot een verdieping en afronding. In dit hoofdstuk zullen de verschillende aspecten hiervan worden uitgewerkt. Voor de elektriciteit zal hetzelfde gebeuren in hoofdstuk 5. Eerst zal echter nog kort worden aangegeven, hoe de warmteverschijnselen in de 8e klas behandeld kunnen worden, zodat iets zichtbaar wordt van wat de leerlingen op dit gebied in het voorafgaande jaar reeds hebben leren kennen.

4.1.1 Warmteleer in de achtste klas - elementenleer

De achtste klas periode krijgt soms als ondertitel 'de vier elementen'. Aansluitend op de Griekse elementenleer kunnen de warmte en de drie aggregatietoestanden in verband gebracht worden met de vier elementen. Dit gezichtspunt kan men als overkoepelend thema hanteren bij de behandeling van de verschillende onderwerpen die voor de achtste klas periode zijn aangegeven. Daarbij kan men van het begin af aan duidelijk stellen, dat de vier elementen 'krachten' zijn, die in de verschijningswereld werken.

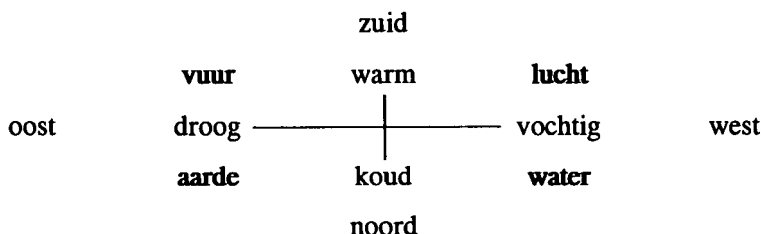
elementenkrachten

vuur
lucht
water
aarde

verschijning

warmte, verbranding
gas, elastisch, samendrukbaar
vloeibaar, smeedbaar
vast, deelbaar, hard

Empedokles stelt als eerste de ordening op aarde voor door de vier elementen aarde, water, lucht en vuur. Ieder element is onvernietigbaar, ongeworden en onveranderlijk. Uit de vermenging van de elementen ontstaan de dingen. Twee de kosmos doortrekkende oerkrachten zijn van invloed op deze vermenging: de 'liefde' die de elementenkrachten verbindt in een verschijnsel en de 'haat', die de werking van de elementenkrachten van elkaar scheidt. In iedere verschijning, zo stelt ook Aristoteles, zijn alle vier elementenkrachten in potentie werkzaam, maar één element overheerst en bepaalt de verschijning. Volgens hem staan de vier elementen in het spanningsveld van de polariteit van centrifugale en centripetale krachten. De concentrische opbouw van de aarde en zijn atmosfeer laat de werkzaamheid van deze polaire krachten zien en de natuurlijke plaats, die een elementenkracht binnen deze polariteit inneemt. Zo behoort de warmte meer bij de centrifugale krachten (opstijgen warme lucht), en komt de grootste werkzaamheid van het vuurelement van buiten de atmosfeer (de zon). Aristoteles brengt de vier elementenkrachten ook in relatie met de vier windrichtingen, die op hun beurt in verbinding gebracht worden met twee polaire kwaliteiten. De polariteit koud-warm hoort bij de windrichtingen noord-zuid, de polariteit droog-vochtig bij de windrichtingen oost-west. Elk van de elementenkrachten vertegenwoordigt daarbij twee kwaliteiten: van elke polariteit één.



Figuur 1

Het vuurelement bijvoorbeeld verenigt dus twee aspecten in zich: het uitdrogende en het verwarmende. Werkt het vuurelement op de levende stof, dan treedt vooral het uitdrogende op de voorgrond (het verhouten van plantenstengels gedurende de zomer), terwijl op de dode stof veeleer een verwarmende werking wordt uitgeoefend (bij het smelten wordt de stof uit een starre toestand bevrijd).

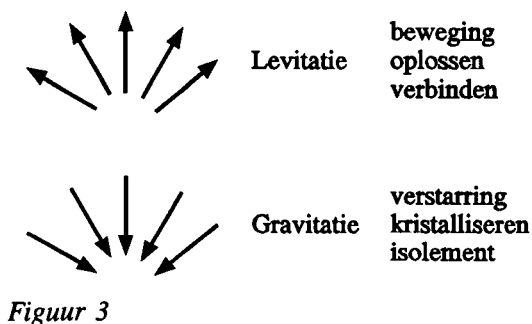
In de achtste klas komt de tegenstelling van centrifugale en centripetale krachten ook aan de orde in de vorm van de samenballende en verijlende krachten: gravitatie en levitatie. De gravitatietendens drukt zich

uit in het gewicht van voorwerpen, in het feit dat vloeistof een oppervlak-begrenzing heeft en in de hechtheid van stoffen. De levitatietendens wordt zichtbaar aan de gewichtsvermindering (opwaartse kracht) bij de proef van Archimedes en aan het verschil tussen een water- en een kwikmeniscus in een glazen buis of aan een water- en kwikdruppel op tafel.



Figuur 2

Hieronder worden nog een aantal begrippen in relatie gebracht met de polariteit levitatie-gravitatie. Samenballen gaat samen met verschijnse-len als verstarring, kristallisatie en zich van de omgeving isoleren (bijvoorbeeld vaste stof vorming). Verijling hangt samen met beweeglijk worden, oplossen en zich verbinden/mengen met andere stof (bijvoorbeeld suiker oplossen in water):



Figuur 3

Naast deze begrippen wordt in de achtste klas vooral ook gewerkt met beelden, die de verwantschap tussen uiterlijke natuurverschijnselen en innerlijke beleving weergeven. Bij de bespreking van het luchtelement

worden de verschillende winden behandeld - maar ook innerlijk kennen we stormen en orkanen. De leerlingen staan vlak voor de aanvang van de puberteit. Door aan de hand van de ordening van de uiterlijke natuur een overeenkomstige ordening in de eigen binnenwereld te ontdekken wordt de leerlingen een belangrijk houvast geboden. Wordt een stof gasvormig, dan mengt het zich geheel met alle andere gasvormige stof in de omgeving. Bij het vast worden isoleert de stof zich van de stof in de omgeving: het wordt een apart voorwerp. Dit laat zich vergelijkingen met het sociale leven, waar de mens zich afwisselend verbindt met de medemens of zich op zichzelf terugtrekt. Dergelijke vergelijkingen tussen verschijnsel en mens maakt het veel leerlingen ook mogelijk zich beter in te leven in de verschijnselen. Naast overdrachtelijk kan men de mens ook letterlijk, dat wil zeggen op lichamelijk niveau, met de uiterlijke verschijnselen vergelijken. In verband met het principe van Archimedes kan bijvoorbeeld gekeken worden naar de hersenen die in het hersenvocht drijven en daardoor 'gewichtloos' zijn.

Wat in het voorafgaande werd aangevoerd is slechts bedoeld als leidraad waarlangs men zelf verder kan zoeken.

4.1.2 Warmteleer in de negende klas

In de 9e klas vormt de warmte niet meer, zoals in de jaren daarvoor, één van de vele fysische verschijnselen die onderzocht worden, maar is het hoofdonderwerp. Uitgebreid wordt op tal van aspecten van de warmte ingegaan en worden de verschijnselen op een meer systematische manier bestudeerd, zodat er verbanden en wetmatigheden zichtbaar worden. De hoeveelheid stof die in dit hoofdstuk wordt beschreven is dan ook zeer omvangrijk. Dit betekent niet dat men in een periode alles aan bod moet laten komen. Veeleer laat dit hoofdstuk de veelzijdige mogelijkheden zien die het onderwerp warmte biedt. Ieder zoeker zich hierin een eigen weg. De verschillende deelthema's binnen het totale gebied van de warmteverschijnselen worden hier zo behandeld, dat docenten enerzijds extra materiaal in handen krijgen en anderzijds zich gestimuleerd kunnen voelen de stof zelf ter hand te nemen. Immers, vooral wat zelfstandig onderzocht en verwerkt wordt, werkt pedagogisch naar de leerlingen toe. Het behoeft daarom geen betoog dat het hier gebodene op geen enkele wijze wil voorschrijven hoe men het thema warmte zou moeten behandelen.

4.2 Periodeopzet

Omdat het in de negende klas belangrijk is nieuwe begrippen zorgvuldig aan de waarneming te ontwikkelen, vormen proeven en proevenreeksen het uitgangspunt. Vaak wordt de opeenvolging van proeven zo gekozen dat begripsvorming hier nauw bij aan kan sluiten: we spreken dan van een waarnemingsreeks. De ontwikkelde begrippen kunnen worden verlevendigd door te zoeken naar beelden uit de (mens-)wereld, die een verwantschap vertonen met het onderzochte verschijnsel. Anderzijds kunnen de verschillende begrippen doorlicht worden met enkele ideeën, die een nog grotere samenhang zichtbaar maken. Vanuit het inzicht dat zo ontstaat kan men dan rekenopgaven maken en de technische toepassing onderzoeken. Beide bevestigen voor de leerlingen de waarde van de gevonden begrippen. Dit geeft hen het gevoel van zekerheid dat zij op deze leeftijd zo nodig hebben. Tevens bieden beide activiteiten de mogelijkheid tot oefening met de gevormde begrippen. Het geheel kan men in het volgende schema onderbrengen:

waarnemen:	proeven (reeksen)
denken:	begripsvorming (verrijkt met beelden en ideeën)
doen:	rekenen, technische toepassing

Men moet de aldus geschetste opzet niet te strikt nemen. Zo kan men ook beginnen met een warmtemachine (bijvoorbeeld een koelkast) en gaan onderzoeken welke verschijnselen daarbij een rol spelen. Vervolgens zoekt men naar de juiste begrippen bij deze verschijnselen en keert dan terug naar de machine om te kijken of men nu met deze begrippen verder gekomen is. Tevens kan men periodes van keer tot keer anders inrichten, daarbij geïnspireerd door de klas en de wens de eigen opzet telkens te vernieuwen.

In het verdere hoofdstuk zullen een aantal deelthema's onderscheiden worden:

- verbranding en zelfontbranding;
- temperatuur en uitzetting;
- warmtecapaciteit;
- warmtestraling;
- warmtegeleiding;
- de gaswetten Boyle/Gay Lussac;
- kook- en smeltpuntafhankelijkheid van druk.

Allereerst zullen de proeven, waarmee men deze deelthema's kan introduceren in paragraaf 4.3 beschreven worden. In paragraaf 4.4 zullen enkele voorbeelden van beeldvorming gegeven worden. In paragraaf 4.5 zal per deelthema behandeld worden hoe begrippen naar aanleiding van deze proeven ontwikkeld kunnen worden en in 4.6 zullen enkele overkoepelende ideeën ontwikkeld worden, waarmee de verschillende deelthema's belicht kunnen worden zodat een grotere samenhang zichtbaar wordt.

Hieronder volgt een puntsgewijs weergegeven voorbeeld van een periode.

Periodeopbouw (toegepast in de 9e klas van de Vrije School te Rotterdam, 1991):

- warmtezintuig, de warmtenatuur;
- c.v. ketelinstallatie;
- de kaarsvlam;
- Franklin;
- warmtegetal van olie en water;
- warmtegetal van aluminium en opgaven;
- aanvulling op Franklin;
- de vier elementen;
- stoommachine: mijnwerkersvriend (Papin, Newcomen), stoomcylinder (Watt);
- ontstaan en vergaan van warmte;
- smelten en stollen van lood;
- anomalie van water;
- levitatie en gravitatie;
- $P/T = \text{constant}$, schaal van Kelvin;
- uitzetting en meting van vaste stoffen, opgaven;
- uitzetting en andere eigenschappen bij vast, vloeibaar en gas;
- onderkoeling van natriumtiosulfaat;
- de koelkast, proces en tegenproces;
- P/T diagram, kritische druk en temperatuur;
- freonproef;
- practicum;
- warmtestraling;
- vier warmteprocessen;
- verbrandingsmotoren: 2-takt, 4-takt en diesel (carburateur, inspuitspomp);
- turbine en straaljagermotor;
- gestiek van de warmte;
- dampdruk.

Benodigde tijd circa drie weken. Men kan zich ook bij de behandeling van de warmte beperken en er twee weken voor uittrekken, zodat men evenveel tijd kan besteden aan elektriciteit.

4.3 De proeven

4.3.1 Inleiding

In hoofdstuk 3.4.2 werd gesteld dat proeven in de negende klas zo moeten worden opgesteld dat oorzaak en gevolg in de verschijnselen duidelijk te onderscheiden zijn. Dit betekent dat men niet bij een enkel geïsoleerd verschijnsel moet blijven stilstaan, maar dat verschijnselen zó in een reeks getoond worden, dat oorzaak en gevolg zich gaan aftekenen bij nadere beschouwing. Gecompliceerde proeven, waar veel factoren tegelijkertijd een rol spelen, zijn niet geschikt voor een negende klas, tenzij men zo'n proef aan het eind van een reeks plaatst, waarin alle factoren afzonderlijk al aan bod zijn geweest.

Men kan een nieuw gebied van verschijnselen inleiden met een ervaringsreeks, om vervolgens een waarnemingsreeks op te zetten, zodat men hiermee tot een bepaald begrip kan komen. Van beide mogelijkheden zullen voorbeelden worden gegeven. De aansluitende begripsvorming wordt in paragraaf 4.5 behandeld.

4.3.2 De ervaringsreeks

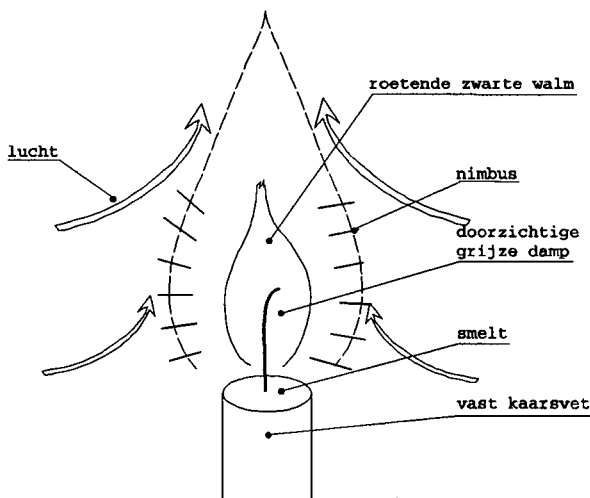
Twee voorbeelden van ervaringsreeksen worden geschetst: de kaars en de proef van Franklin.

Eerste voorbeeld van een ervaringsreeks: verbranding en zelfontbranding aan de hand van de kaars

Plaats een kaars met een witte lont in een kandelaar. Het kaarsvet is hard en ondoorzichtig. Ontsteek de kaars met een brandende lucifer. Het lontje vat vlam - de vlam kruipt langs de lont naar beneden en wordt steeds kleiner. Langzaam smelt het bovenste kaarsvet. De klein geworden vlam laait weer op en na een zekere tijd brandt de kaars met een strakke, rustige vlam. Het kromme lontje steekt, soms rood opgluoiend, aan de rand van de vlam naar buiten.

Er ontstaat een smelt waar vooral aan de oppervlakte bewegingen te zien zijn. Het vaste kaarsvet wordt aan de bovenkant iets warmer en is doorstraald met licht. De vlam is strak gevormd, met rondom een *licht-schijnsel*. Het kleurverloop van de vlam is anders tegen een lichte dan tegen een donkere achtergrond. De onderzijde openbaart zich als een 'troebel medium'. Tegen een donkere achtergrond is het blauw, tegen een lichte zo goed als doorzichtig.

Met een gaasje (vlamverdeler) toont zich het volgende: boven de vlam gehouden ontstaat er een *zwarte walm*. Beneden in de vlam gehouden, ontstaat er een *grijze damp*. De zwarte walm laat een brandende lucifer uitgaan, de grijze damp laat deze juist extra branden. Blaast men de kaars uit, dan stijgt er een grijze damp op die gemakkelijk vlam vat. Houdt men een lucifer kort in de vlam, dan blijkt deze alleen aan de rand van de vlam te verschroeien. Hieruit blijkt dat de vlam alleen in de omtrek aanwezig is. De vlam is als het ware hol. Zo wordt gesproken van een verbrandingsvlak of mantel.



Figuur 4

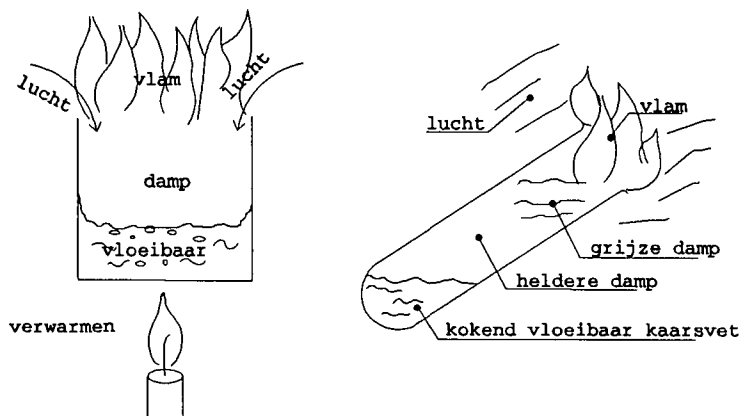
De omringende lucht en de lont spelen een belangrijke rol bij de vorm van de vlam. Verhoogt men met een kraagje de bovenkant van de kaars, dan gaat de vlam uit. Plaats de kaars in een glas en draai het in een boog rond dan zal de vlam verrassend genoeg naar binnen wijzen. Plaatst men de kaars voor een scherm en op enige afstand daarvan een diaprojector, dan ziet men een zeer beweeglijk stromingsbeeld om de kaars heen.

Met de hand boven de vlam kan tegelijkertijd het stromende gas gevoeld worden. Een koud glas over de vlam geplaatst wordt van binnen vochtig.

Op een overeenkomstige manier kan men het leren kennen van de kaars vanuit de waarneming voortzetten. Andere vlammen en opstellingen zullen zich hierbij aansluiten. Zo ook de waarneming dat de vlam aan de pluskant van een elektriseermachine wordt afgestoten en aan de minkant wordt aangetrokken. Samenvattend kan aan de kaars onderscheiden worden:

- het verbrandingsvlak, te weten:
 - . het licht;
 - . de warmte;
 - . het vochtige gas;
 - . de zwarte roetende walm;
 - . het elektrisch effect;
- de grijze kaarsvetdamp en de lucht er om heen;
- de vloeibare smelt;
- het vaste kaarsvet.

De volgende voortzetting krijgt al meer het karakter van een waarnemingsreeks: In een bekersglas van 250 cc of een grote reageerbuis laat men kaarsvet smelten, verdampen en vervolgens verbranden. Vooral bij de grote reageerbuis is boven de kokende vloeistof een heldere damp en vervolgens een grijze damp goed te onderscheiden.



Figuur 5

De reageerbuis houdt men eerst schuin en nadat de vloeistof eenmaal goed is gaan koken, steekt men de damp aan. Vervolgens houdt men de reageerbuis recht boven de vlam. Het verdampte kaarsvet blijft nu als een dikke grijze rook in de buis hangen, terwijl de vloeistof verder kookt. Giet men vervolgens de reageerbuis vanaf enige hoogte leeg op een wateroppervlak dan wordt een wolk kaarsvetdamp omhoog gestuwd en zal er door zelfontbranding de vlam in slaan (voorzichtig, afstand houden!).

Men kan bovenstaande proeven nog aanvullen met het verbranden van olie, benzine, paraffine, etc., waarbij men steeds weer merkt dat de damp alleen brandt, wanneer die voldoende heet is. Ook zelfontbranding is met dergelijke stoffen mogelijk. Men kan bijvoorbeeld in een pollepel brandende paraffine afdekken, zodat de vlam dooft. Haal de afdekplaat weg en de paraffine dampt hevig. Na enig schudden treedt zelfontbranding op.

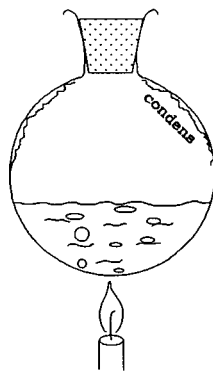
Tweede voorbeeld van een ervaringsreeks: kook- en vriespuntsverandering aan de hand van de proef van Franklin

Door velerlei verschijnselen hebben de leerlingen de stellige overtuiging dat alle stoffen bij één bepaalde temperatuur smelten respectievelijk stollen. Na hierop te hebben gewezen wordt een proef uit de achtste klas in herinnering gebracht: het koken in vacuüm. Vervolgens wordt de proef van Franklin gedaan:

Proef van Franklin:

Een *extra* dikwandige rondbodemkolf van 1 liter wordt verwarmd totdat het water kookt. Met een passende stop wordt de kolf afgesloten. Eerst voorzichtig, daarna steviger. Zet de brander dan niet te hard, zodat goed zichtbaar is dat het kookproces geremd wordt.

Vervolgens vliegt de stop eraf - en met enig geluk kookt het water zo heftig dat het uit de kolf spat. Dit is natuurlijk voor herhaling vatbaar. Nadat het water flink gekookt heeft wordt de brander weggenomen en de stop op de kolf gedaan. De stop wordt erin gezogen en zet zich vast (pas op voor een te kleine stop - die kan naar binnen gezogen worden en vliegt dwars door het glas). Draai nu de kolf om en laat het water tot rust komen.

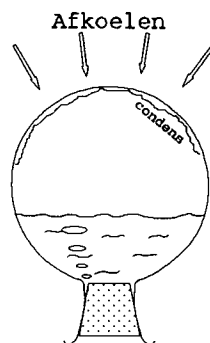


Figuur 6

Koel de kolf met een vochtige doek af - de kolf beslaat en het water begint te borrelen. Dit kan vele malen herhaald worden, ook wanneer de kolf al verder afgekoeld is.

Een beeld maakt de proef nog onvergetelijker door te zeggen 'aai hem zachtjes over z'n bol en dan is hij weer blij'. Wrijf dan met de natte doek over de kolf en het koken begint weer.

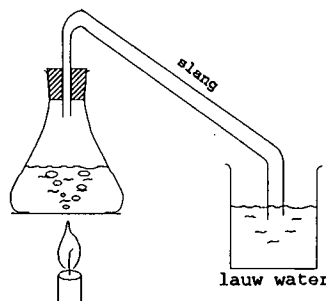
Als men de volgende dag met de leerlingen probeert deze proef te begrijpen, dan kan het nodig blijken nog enige proeven toe te voegen:



Figuur 7

1. Het verdampen van ether op de hand, maakt de temperatuursverlaging direct waarneembaar.

2. Het water in de erlenmeyer wordt verwarmd. In het bekglas met koud water ziet men luchtballen uit de slang komen en naar boven borrelen. Kookt het water dan neemt het aantal luchtballen af tot nihil en hoort men gepruttel. Haal de slang uit het water, de stoom wordt de lucht in geblazen en condenseert in fijne druppeltjes mist. Weer in het bekglas hoort men geklap en gepruttel. De stoom condenseert, klapt in elkaar.



Figuur 8

Haal nu de brander weg en laat de erlenmeyer afkoelen aan de lucht. Het water wordt ingezogen. Komt er één druppel in de erlenmeyer dan wordt het water versneld ingezogen. Begrip: de stoom in de erlenmeyer condenseert en vacuüm ontstaat.

3. Neem een langwerpig metalen siroopblik van 1 liter en breng hierin een laagje water aan de kook. Kook flink door en houdt daarna het blik op z'n kop in een bakje met koud water. Na enige seconden implodeert het blik.

4.3.3 De waarnemingsreeks

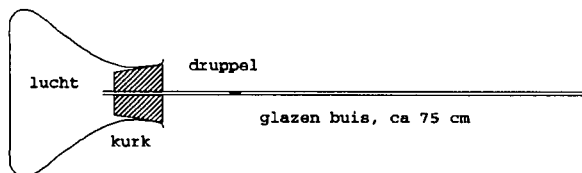
In deze paragraaf zijn meerdere voorbeelden van waarnemingsreeksen opgenomen, waarvan de begripsvorming in paragraaf 4.5 volgt. De voorbeelden die in deze paragraaf zijn opgenomen luiden:

1. uitzetting en temperatuur;
2. warmteverbondenheid of warmtecapaciteit;
3. warmtestraling;
4. warmtegeleiding;
5. Boyle/Gay Lussac;
6. smelten en verdampen bij veranderlijke druk;
7. verbranding en explosie.

Eerste voorbeeld van een waarnemingsreeks: uitzetting en temperatuur

Het doel van deze reeks is om er het begrip temperatuur aan te kunnen ontwikkelen. Men maakt de uitzetting van gas (lucht), vloeistof (water) en vaste stof (metaal) kwantitatief meetbaar.

Proef 1. Uitzetting van lucht - de 'gasthermometer'.

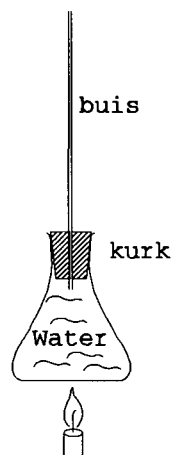


Figuur 9

Men houdt een erlenmeyer (250 cc) met glazen buis en druppel horizontaal en verwarmt hem met de handen. De lucht reageert snel en zet veel uit. Bij afkoeling krimpt de lucht weer evenveel in.

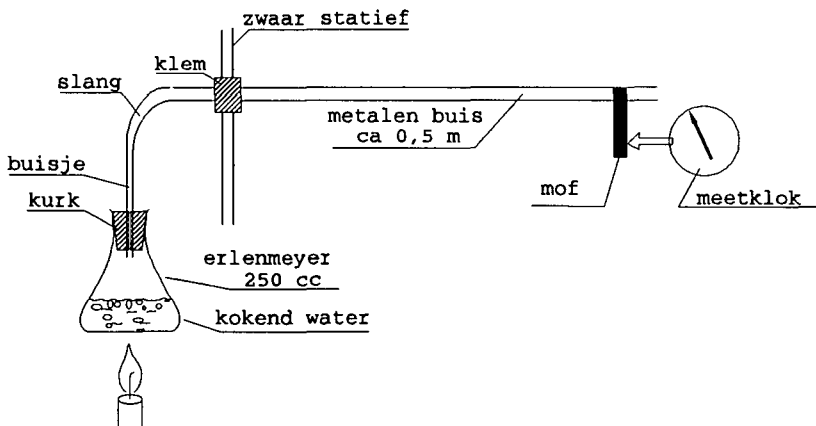
Proef 2. Uitzetting van water - de 'vloeistofthermometer'.

De erlenmeyer vol water moet met een vlam verwarmd worden om een zichtbare waarneming te krijgen. De uitzetting kan niet tegengehouden worden. Bij afkoeling volgt inkrimping.



Figuur 10

Proef 3. Uitzetting van metaal - de 'vaste stof thermometer'.



Figuur 11

Zet de hele opstelling klaar en stel de meetklok op nul. Breng het water aan de kook en koppel de slang aan de buis. Plaats de kurk met slang pas op de erlenmeyer wanneer het water kookt (dit in verband met stoten en trillen).

Meetvoorbeeld: een koperen buis van $\frac{1}{2}$ m wordt bij verwarming van 20° tot 100°C 0,69 mm langer. Men maakt met de leerlingen een tabel:

<u>lengte</u>	<u>toename temperatuur</u>	<u>verlenging</u>
$\frac{1}{2}$ m	$100-20=80^\circ\text{C}$	0,69 mm
1 m	80°C	1,38 mm
1 m	1°C	$\frac{1,38}{80} = 0,017 \text{ mm}$

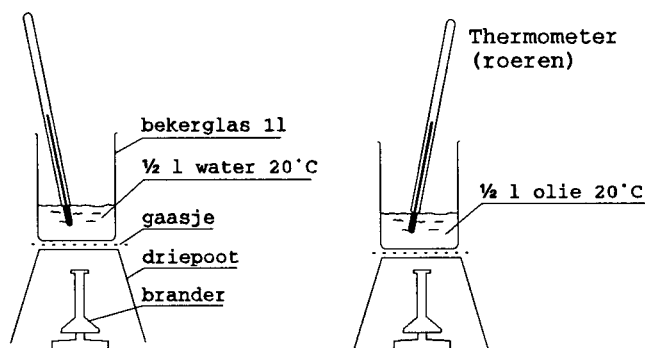
Een staaf van 10 m die 30°C wordt verhit zal dus $0,017 \times 10 \times 30 = 5,1$ mm uitzetten. Algemeen geldt: verlenging = uitzetting per graad per m lengte x temperatuursverschil x lengte.

Tweede voorbeeld van een waarnemingsreeks: warmtecapaciteit of warmteverbondenheid

In circa 1760 ontdekte J. Black (1728-1799) een warmteverschijnsel dat niet zo snel in het oog springt. Dit verschijnsel drukt zich alleen uit in de tijd. Wanneer het in de herfst langzaam kouder wordt en het in december dan uiteindelijk vriest, dan valt op dat pas na verloop van tijd sloten en dergelijke dichtvriezen terwijl de grond allang hard is. Na de winter vindt het omgekeerde plaats. Het ijs in meren en plassen ontdooit maar langzaam, terwijl de plantsoenen en de wegen allang ijsvrij zijn.

Proef 1.

Maak de volgende identieke opstellingen, maar vul het ene bekeerglas met een halve liter water en het andere met een halve liter bakolie.



Figuur 12

Met behulp van een gaasje wordt vergeleken of de branders even fel branden. Vervolgens wordt om de minuut de temperatuur gemeten.

<u>tijd (minuten)</u>	<u>temp. water (°C)</u>	<u>temp. olie (°C)</u>
0	19,5	21
1	27	40
2	36,5	59
3	45	78
4	53	98
5	61,5	117

In vijf minuten neemt de temperatuur van het water met 42°C toe en die van de olie met 96°C . De olie wordt dus $96/42 = 2,3$ maal sneller warm dan water.

Proef 2.

In een bekersglas van 1 liter wordt $\frac{1}{4}$ liter water van 20°C en $\frac{1}{4}$ liter olie van 80°C gemengd en de eindtemperatuur gemeten.

Proef 3.

Hetzelfde als proef 2 maar nu met verschillende volumina.

Proef 4.

Een warm blokje hout, metaal of steen in water van 20°C onderdompelen en de eindtemperatuur meten. De blokjes worden in een apart bekersglas met kokend water voorverwarmd.

Derde voorbeeld van een waarnemingsreeks: warmtestraling

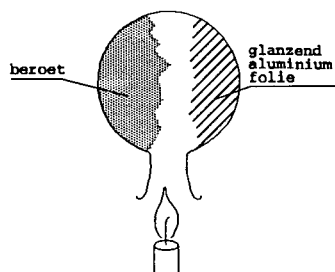
Staat de zon stralend aan de hemel, dan worden de beschenen oppervlakken warm. Een oppervlak wordt des te warmer naarmate het groter, doffer en donkerder van kleur is. Wanneer stoffen warmer zijn dan hun omgeving zullen ze door uitstraling afkoelen. Zowel bij instraling als bij uitstraling geldt dat van twee identieke oppervlakken het donkerste en dofste oppervlak het sterkst zal opwarmen of afkoelen.

Proeven:

1. Twee thermometers in de zon houden, waarvan er een dof zwart beroet is.
2. Een glasplaat voor de helft beroeten en voor de andere helft met aluminiumfolie beplakken. De plaat in de zon houden en aan de achterkant de temperatuur voelen. (Kan ook met diaprojector zonder warmteglas en lens. Pas op voor het smelten van de lenshouder).
3. Maak met zonlicht en een brandglas een wit, geel, blauw en zwart stuk papier warm. Het zwarte zal het eerste gaan smeulen.
4. Plaats vier met deksel afgesloten metalen bekertjes in de zon, een dof zwarte, een glanzend zwarte, een dof witte en een glanzend witte. Na

verloop van tijd wordt de temperatuur van de lucht in de bekens gemeten.

5. Plaats identieke bekens nu gevuld met kokend water in een donkere of lichte ruimte. Welke koelt het snelste af? Maak een temperatuur-tijd grafiek. Speelt het licht of donker zijn van de ruimte een rol?
6. De kubus van Leslie geeft dezelfde bevindingen als proef 5.
7. Een rondbodemkolf van 1 liter wordt aan één kant beroet en aan de andere kant met aluminiumfolie beplakt en vervolgens boven een vlam verwarmd. Voel de uitstraling met twee handen op afstand.
8. Ga na dat met een metalen spiegel de warmtestraling van richting te veranderen is. Doe hetzelfde eventueel ook met een doffe spiegel.
9. Concentreer de warmtestraling van bijvoorbeeld de zon met behulp van een holle spiegel of een bolle lens en ontsteek hiermee een lucifer.
10. Introduceer een thermozuil (serie thermokoppels) als thermometer. Plaats voor een diaprojector een bak water en constateer met behulp van de thermozuil dat er achter de bak wel licht, maar minder warmtestraling is.
11. Kasprincipe: de zon straalt door glas in een kas. De warmte die in de kas ontstaat straalt niet uit.



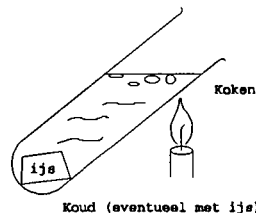
Figuur 13

Vierde voorbeeld van een waarnemingsreeks: warmtegeleiding

Het proces waarbij in materialen temperatuurverschillen zich vereffenen noemt men warmtegeleiding. Houdt men bijvoorbeeld het einde van een stuk glas of koper in een vlam dan wordt het hele stuk koper na verloop van tijd warm. Bij glas duurt dit veel langer.

Proeven:

1. Verwarm een aantal even grote stroken metaal (koper, aluminium, zink en ijzer van 20 x 4 x 0,15 cm) in een vlam. Het koper zal het eerst ondraaglijk heet worden, daarna aluminium, zink en ijzer als laatste.
2. Een glasplaat verwarmen en er water overheen gieten. Een abrupte grensovergang van koud naar warm is dan zichtbaar.
3. Water koken in een reageerbuisje. Doe een ijsklontje in een reageerbuis en vul hem met water. Verwarm de buis aan de bovenkant. De onderkant blijft nu koud.



Figuur 14

4. Een luchtlaag isoleert zeer sterk: dubbel glas, dekbed, thermoskan, spouwmuur, wollen trui, koelkast, schuimrubber om pijpen te isoleren. Vergelijk bijvoorbeeld de isolerende werking van een dubbele glasplaat met en zonder luchtlaag ertussen.
5. Proef met het toestel van Ingenhousz.
6. Een dansende waterdruppel op een warme metalen plaat of pan (Leidenfrost fenomeen).
7. Een gasvlam gaat niet door een gaasje (mijnwerkerslamp van Davy, 1815).
8. Een warm blokje metaal op een bevroren stuk hout. In de draadrichting smelt het sneller.
9. Allerlei voorwerpen in kokend water plaatsen en voelen welke voorwerpen het snelst warm worden.
10. Koperen staaf met luciferkoppen op gelijke afstand. (Duurt wel enige tijd).

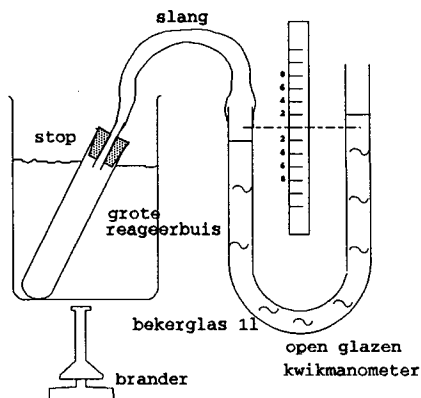
Vijfde voorbeeld van een waarnemingsreeks: Boyle/Gay Lussac

In de achtste klas is de tendens van de warmte en het gas reeds besproken. Deze tendens is oplossen, vrijlen, volledig vermengen, streven naar eenheid. Wordt een gas samengeperst, dan wordt zijn verlangen naar zijn 'natuurlijke plaats' des te groter. Dit uit zich in grotere druk.

Proeven:

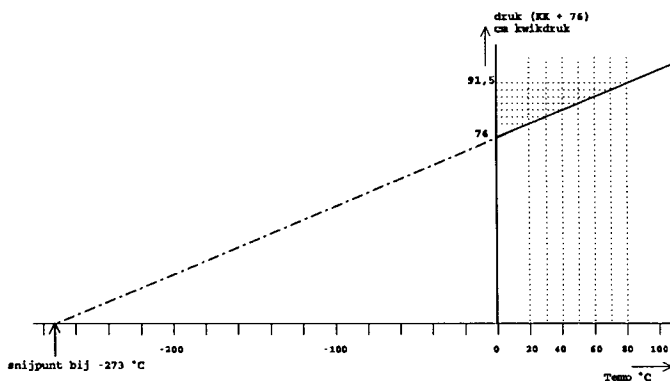
We meten steeds op dezelfde tijdstippen temperatuur en overdruk (in cm kwikkolom = cmkk).

<u>temperatuur (°C)</u>	<u>overdruk (cmkk)</u>
20	0 (begin)
30	2.5
40	5.0
50	8.0
60	10.5
70	13.0
80	15.5



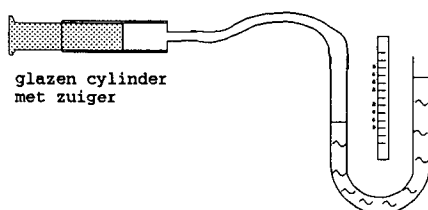
Figuur 15

Deze getallen worden uitgezet in een T-P grafiek. De overdruk wordt daarbij opgeteld bij de gewone luchtdruk van 76 cmkk (1,014 bar):



Figuur 16

Naast metingen met variatie van temperatuur en druk kan men met een glazen cylinder met aangekoppelde drukmeter het verband tussen druk en volume meten.



Figuur 17

We voegen nog enige proeven toe die het verschijnsel *dampdruk* laten zien. Bij de begripsvorming wordt aan dit verschijnsel geen nadere aandacht besteed.

Tussen de vaste stof en de gasfase staat de vloeistoffase als een uitgespaarde en overgangs-aggregatietoestand. Vaste stoffen en vloeistoffen hebben altijd een damp om zich heen: ze verkeren ook altijd gedeeltelijk in de gasfase. De mate waarin een stof een gasatmosfeer om zich heen heeft wordt weergegeven door de dampdruk. Breng een stof in vacuüm en kijk welke dampdruk ontstaat. De vaste stof- of de vloeistoffase moeten ook zichtbaar aanwezig blijven om de maximale dampdruk te laten ontstaan.

Proeven:

1. Maak een buis van Torricelli en breng met een spuit vloeistof in de buis. De mate waarin de kwikkolom daalt ten opzichte van de atmosferische druk is de maat voor de dampdruk.



Figuur 18

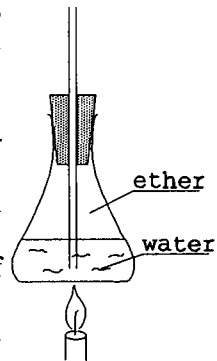
Verzadigde dampdruk in cmkk (76 cmkk = 1 atm)

	0°C	20°C	60°C	100°C
kwik	0,00002	0,00010	0,00250	0,02800
water	0,46	1,75	14,9	76
alcohol	1,27	4,4	35	169
ether	19	44	174	490 = 6,5atm
freon (koelkast)	304	433	1216 = 16atm	
ammoniak	325	651	2280 = 30atm	
vast jodium	0,003	0,035	1,2	

2. Spuit ether in een fles, die gedeeltelijk gevuld is met water. Bij verwarmen van de fles spuit het water uit de fles.

3. Er zijn vaste stoffen die zonder vloeibaar te worden verdampen zoals jodium, kamfer, een toilet-blokje, maar ook ijs en sneeuw. De dampdruk van ijs bijvoorbeeld is 0,46 cmkk bij 0°C. Als de lucht maar droog genoeg is vriest een grasveld of straat schoon.

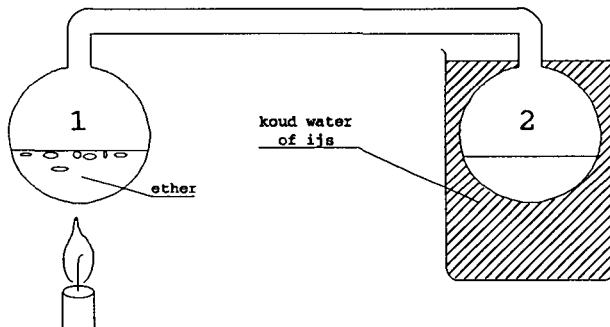
De dampdruk van vaste stoffen is meestal heel laag, maar toch heeft iedere stof een dampatmosfeer om zich heen. De dampdruk is onafhankelijk



Figuur 19

van het volume aan vaste stof of vloeistof en is ook onafhankelijk van de andere dampen of gassen die in de ruimte zijn. Iedere stof doet net alsof hij alleen in de ruimte is (wet van Dalton: de druk in de ruimte is de som van partiële drukken).

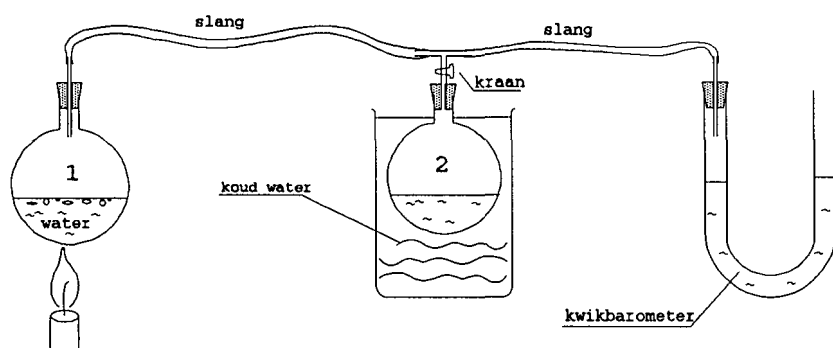
4. De dampspanning wordt bepaald door de laagste temperatuur in een ruimte (beginsel van Watt). De proef met de bollen van Watt (figuur 20) laat dit schitterend zien: in bol 1 verdampt ether en in bol 2 condenseert die weer.



Figuur 20 Bollen van Watt (liefdesmeter)

Men kan deze proef ook doen met een opstelling volgens figuur 21 die zelf gemaakt kan worden.

Staat de kraan open, dan blijft de druk constant zolang het water in rondbodembolk 2 niet warmer wordt. Wordt de kraan gesloten, dan stijgt de druk direct.



Figuur 21

5. De vochtigheid van de lucht is binnen meestal circa 60%. Dat wil zeggen dat bij 20° in een lokaal van $8 \times 8 \times 3,2 = 224 \text{ m}^3$ er $2\frac{1}{4}$ liter water in dampvorm aanwezig is.

Berekening:

20°C → dampdruk 1,75 cmkk.

vochtigheid 60%

onverzadigde druk = $0,6 \cdot 1,75 = 1,05$ cmkk.

dichtheid verzadigde waterdamp: $0,0173 \text{ kg/m}^3$ (bij 20°C en $p = 1,75$ cmkk).

dichtheid onverzadigde waterdamp: $0,0173 \times \frac{1,05}{1,75} = 0,01 \text{ kg/m}^3$.

In 224 m^3 zit $0,01 \times 224 = 2,24 \text{ kg} \rightarrow 2,24$ liter water.

Bij 10°C en 60% vochtigheid in een lokaal van 224 m^3 is dit 1,25 liter.

Bij 30°C en 60% vochtigheid in een lokaal van 224 m^3 is dit 4 liter.

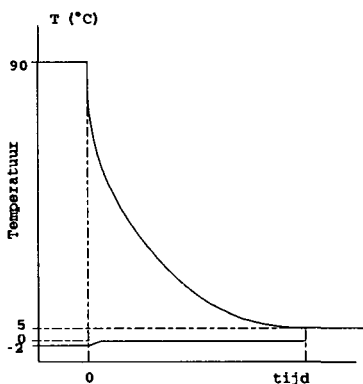
Zesde voorbeeld van een waarnemingsreeks: smelten en verdampen bij constante en veranderlijke druk

De proef van Franklin, die in paragraaf 4.3.2 als ervaringsreeks werd beschreven, kan men ook opnemen in een waarnemingsreeks van proeven, die te maken hebben met fase-overgangen. Daarbij worden eerst

de fase-overgangen onder normale omstandigheden bekeken. Vervolgens wordt de invloed van druk en toevoegen van zout op het smelten respectievelijk het koken onderzocht. Zo'n waarnemingsreeks kan de volgende vorm aannemen:

1. Bij het smelten van ijs blijft de temperatuur constant. Sla in een theedoek met een hamer wat ijs fijn en doe dit in een klein bekeerglas. Meet onder voortdurend roeren de temperatuur van het smeltende ijs en zet dit voort tot een flink deel gesmolten is.
2. Kokend water blijft 100°C . Dit is in de achtste klas al bekeken, of eerder.

3. Neem 1 liter ijs van -2°C en doe dit in een conservenblik van 2 liter, waar 1 liter water van 90°C in zit. Na enige tijd is het ijs gesmolten en de eindtemperatuur zal bijvoorbeeld 5°C zijn. In een grafiek kan het proces als volgt weergegeven worden. Proef en grafiek geven weer dat het water 85°C afkoelt en dat het ijs tot 0°C opwarmt en bij constant blijvende temperatuur smelt.



Zoals uit de grafiek blijkt zal het afkoelen van het water en het smelten van het ijs in het begin snel

gaan. De temperatuurveranderingen zullen steeds langzamer verlopen, totdat uiteindelijk al het ijs gesmolten is.

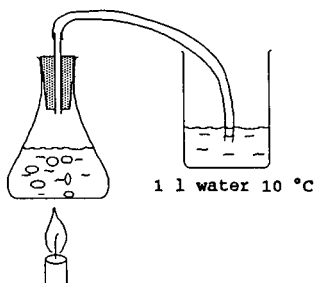
4. De verdampingswaarde bepaalt men als volgt:

Breng het water in de erlenmeyer aan de kook en plaats dan pas de slang in het bekeerglas koud water. Ga na hoeveel water er verkookt in de tijd dat het koude water van 10° tot 90° stijgt.

De berekening verloopt nu als volgt:

Stel dat 140 ml verdamt. Wanneer 1 liter = 1000 ml water verdamt kun-

nen daarmee $1000/140 \approx 7$ bekeerglazen van 1 liter, van 10° tot



Figuur 23

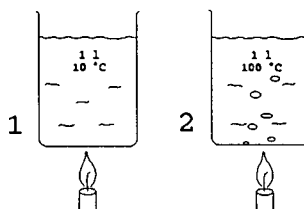
90° verhit worden. De verdampingswarmte voor 1 liter water is dus $7 \times (90 - 10) = 560$ kcal.

Een variant op deze proef is de volgende:

Twee identieke opstellingen met even grote vlammen (dit kan men instellen door een gaasje in de vlam te houden. Het gaasje moet in beide vlammen even sterk opgloeien). Op het moment dat het water in bekersglas 2 kookt, begint de proef.

Stijgt de temperatuur van bekersglas 1 van 10° tot 90°C, dan verdamt 140 ml water

in bekersglas 2. De berekening van de verdampingswarmte verloopt overeenkomstig het vorige voorbeeld.



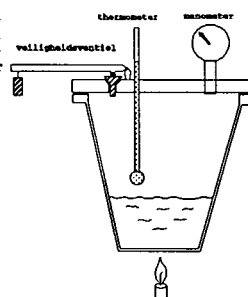
Figuur 24

5. Doe natriumthiosulfaat in een grote reageerbuis en verwarm deze met een brander. De stof lost op in het eigen kristalwater. Laat het koken tot de vloeistof helder is. Laat het nu aan de lucht afkoelen tot kamertemperatuur. Let op dat er geen kleine kristalletjes op de rand van het glas zitten. Voeg nu een klein kristalletje toe. De vloeistof zal nu snel kristalliseren, terwijl de temperatuur oploopt tot bijvoorbeeld 50°C.

6. Franklin.

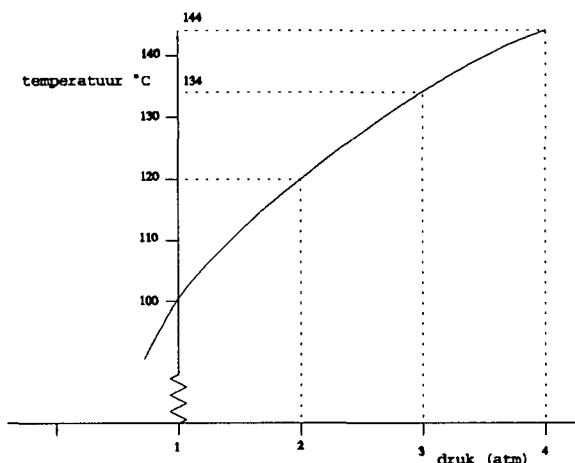
7. De stoompot van Papin. Met behulp hiervan wordt de kooktemperatuur in relatie tot de druk gemeten. Zie voor Papin's machine paragraaf 4.8.

Meting:	<u>temperatuur</u>	<u>druk</u>
	100°C	1 atm
	105°C	1,2 atm
	120°C	2 atm
	135°C	3 atm



Figuur 25

Maak vervolgens een druk/temp grafiek waarbij verticaal de temperatuur afgezet wordt.



Figuur 26

Abstract gezien is het natuurlijk gelijkwaardig of P of T verticaal afgezet wordt, vanuit de menselijke oriëntatie in de ruimte is het logischer T verticaal te plaatsen. Temperatuursverhoging gaat immers in vele gevallen gepaard met de faseveranderingen van vaste stof naar vloeistof en van vloeistof naar gas. Voor onze ervaring hoort de vaste stof bij de aarde, dat wil zeggen *onder*, terwijl het gas in het lucht-ruim ofwel *boven* thuishoort.

Aansluitend wordt verteld over het koken in de bergen op grote hoogte en in een hoge drukpan. De grafiek wordt dan naar links verlengd en uit een tabellenboek worden enige waarden toegevoegd.

<u>hoogte</u>	<u>druk</u>	<u>kooktemperatuur</u>
zeeniveau	1 atm	100°C
1,2 km	0,85 atm	95°C
3 km	0,66 atm	90°C
5 km	0,5 atm	80°C

- De vriespuntverlaging van water door druk kan heel goed gedemonstreerd worden. Neem een blok ijs (een broodtrommel water in een vriesvak plaatsen) en hang er met een zeer dunne ijzerdraad een zwaar gewicht aan (bijvoorbeeld 5 kg). Plaats de uiteinden van het blok ijs op twee tafels. De draad gaat door het ijs zonder dat het blok blijvend doorgesneden wordt; het vriest weer aan elkaar.

Een verhaal over gletsjers completeert dit: een gletsjer stuwt tegen de rotswand, smelt, verandert van vorm en glijdt zo langzaam naar beneden.

9. Doe fijngestampt ijs in een klein bekersglas en meet de temperatuur van het smeltende ijs. Voeg nu een ruime hoeveelheid zout toe en vermeng dit met het ijs. Het ijs smelt zeer snel, terwijl de temperatuur sterk daalt.

Aansluitend kan men het kookpunt bepalen van water met zout: 100 gram zout opgelost in één liter water geeft een kookpuntsverhoging van een kleine 4°C .

10. Proeven rond de kritische temperatuur.

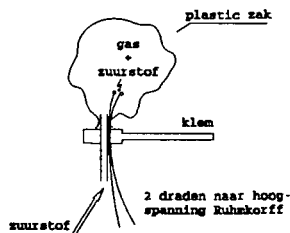
Via Breukhoven is bij Leyboldt een prachtige proef te koop om de processen op en rondom de kritische temperatuur en druk te demonstreren. Het abrupt verdwijnen van de vloeistoffase is spannend, maar het verschijnen van de vloeistof- en gasfase bij afkoeling is werkelijk iets bijzonders. Het is een van de mooiste proeven die in deze periode getoond kunnen worden. De stof freon is in de doorzichtige kamer opgesloten, met een kritische druk en temperatuur van 30 atm en 82°C .

Zevende voorbeeld van een waarnemingsreeks: verbranding en explosie

Deze reeks is vooral van belang voor de verbrandingsmotor en sluit aan bij de ervaringsreeks over de kaarsvlam, die in paragraaf 4.3.2 werd beschreven.

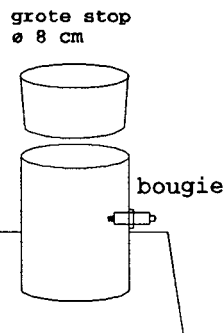
1. Verbrand in een schaalte of conservenblikje olie, petroleum, spiritus, ether en benzine. Benzine ontsteekt relatief moeilijk en geeft een smerige vlam. Door stevig in het vuur te blazen ontstaat veel warmte. Spiritus geeft ongeveer de helft aan warmte bij gelijk volume.
2. Leg een aantal glasplaten aan elkaar, zodat een lange strook ontstaat. Spuit hier met een pipet een baan brandstof op en ontsteek het aan één kant. De verbrandings- en verdampingssnelheid worden onder deze omstandigheden ($p = 1$ bar en $T = 20^{\circ}\text{C}$) zichtbaar gemaakt. Pas op met ether, het spuit vaak - door verdamping - de pipet uit. Ook op de glasplaat is het al verdampt voor het aangestoken kan worden.

3. Doe benzine in een goed werkende plantespuit. Let er op dat het plastic niet oplost. Versproei de benzine in de richting van een kaarsvlam. Een prachtige steekvlam ontstaat.
4. Neem een plastic zakje (boterhamzakje-formaat) en vul dit voor een derde deel met aardgas. Blaas de zak verder op met zuivere zuurstof. (Neemt men gewone lucht, dan speelt de verhouding een belangrijke rol). Ga op flinke afstand staan. Een oorverdovende knal ontstaat wanneer de vonk knettert.



Figuur 27

5. Dezelfde proef, maar nu met een klein scheutje benzine in de plastic zak. Deze proef lukt moeilijker, omdat de verhouding benzine/zuurstof nauwkeurig afgestemd moet zijn.
6. Een vergelijkbare proef kan uitgevoerd worden, wanneer men in een cilinder een explosie laat plaatsvinden, zodat een stop er af vliegt. Gebruik een dikke plexiglas buis op een voetplaat. Veiliger is een stalen buis (de plexiglas uitvoering is bij de schrijver eenmaal uit elkaar geklapt, toen er compressie vooraf gegeven werd).



Figuur 28

a. *Open cilinder*

Vul de cilinder met een aantal druppels benzine en blaas in de buis om verdamping te bevorderen. Men kan ook een stop aan een staaf nemen, die in de buis past en deze enige malen op en neer pompen. Laat de vonk knetteren en een lichte explosie volgt en brandt nog even na.

b. *Stop op de cilinder*

Vul de cilinder met een scheutje benzine en lucht en sluit hem af met de stop. Enige malen schudden. Een mooie explosie volgt na ontsteking. Herhaal de proef met zuurstof. De explosie zal nu heftiger zijn. Herhaal de proef met andere brandstoffen: aardgas en butagas. Voeg zuurstof toe.

c. *Voorverwarmen*

Herhaal de proef onder b, maar nu met een middels een gasbrander voorverwarmde metalen cilinder.

d. *Vulkraan toevoegen*

Maak nu in de zijkant van de cilinder een vulkraan voor zuurstof. Vul de cilinder met benzinedruppels. Doe de stop er stevig op en vul met zuurstof. Na ontsteking volgt een schitterende explosie. Wanneer de cilinder wordt voorverwarmd verloopt de explosie nog heftiger.

Als men aansluitend de explosiemotoren behandelt, kan men vertellen dat een explosie ongeveer een duizendste seconde duurt. Het motortoerental is op topsnelheid bijvoorbeeld 6000 omwentelingen per minuut. De zuigersnelheid varieert daarbij tussen rust en 500 km/h. Op de zuiger werken per explosie krachten van duizenden kilogrammen. Er ontstaan temperaturen van 1700° C. Komt de explosie niet op het juiste moment, dan neemt het rendement met forse schreden af. Te vroege ontsteking werkt het proces tegen, te late is mosterd na de maaltijd.

De huidige motoren met injectiesysteem of 'turbo' leveren per cilinder nog meer vermogen. Bij de injectiemotor wordt de benzine gedoseerd in het luchtkanaal gespoten en versproeid. Bij de turbomotor vindt de toevoer van het benzine/lucht mengsel plaats onder hoge druk. Meestal wordt de turbo alleen gebruikt het bij optrekken en accelereren. Turbo-installaties werden voor het eerst bij racewagens toegepast in 1979. Tegenwoordig wordt door meerdere in- en uitlaatkleppen toe te passen de zuiverheid van het brandstofmengsel verbeterd.

In ruimer verband zullen de explosiemotoren in paragraaf 4.8 besproken worden.

4.3.4 Een rouleerpracticum warmteleer

1. *Werking van de brander*

- Vlamonderzoek
 - weinig lucht → oranje, stralend, lichtend warm, ondoorzichtig
 - veel lucht → blauw, heet, niet stralend, transparant
- Warmteverdeling van de vlam onderzoeken met een gaasje.
- Maak een tekening.

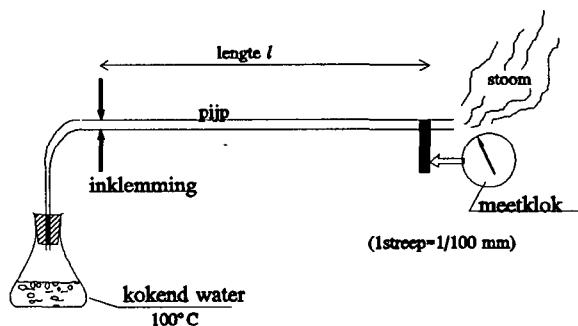
2. Warmte uitbreiding:
 - verschillende voorwerpen in kokend water
 - thermocolor
 - water in een reageerbuisje van boven laten koken (van onder blijft het koud).
3. Stroming:
 - groot bekerglas heel langzaam op één plaats verwarmen, stroming zichtbaar maken met kleurstof
 - stromingsbuis (c.v. principe zonder circulatiepomp).
4. Verwarmen en koken van water. Bij welke temperatuur ontstaan en verdwijnen luchtbelllen, wanneer waterdampbelllen?
Temperatuur/tijd grafiek maken.
5. Temperatuurverlaging door zout in water op te lossen. Neem weinig water, 30 cm³ van 20°C en los steeds 1 theelepel zout op. Breng deze oplossing vervolgens aan de kook en meet de kookpuntsverhoging.
Plaats de oplossing na afkoeling in een metalen mok in het vriesvak van een koelkast en kijk bij welke temperatuur hij bevriest.
6. Bepaling van het warmtegetal van verschillende blokjes metaal, hout, steen. Maak het blokje (2x2x4 cm³) warm in kokend water en doe het vervolgens in 25 cm³ water van 20°C.
Meet de eindtempertauur en bereken de opwarmsnelheid met de formule

$$\frac{\text{opwarmsnelheid blokje}}{\text{opwarmsnelheid water}(=1)} = \frac{\Delta T \text{ blokje}}{\Delta T \text{ water}} \times \frac{\text{Volume blokje}}{\text{Volume water}}$$

Het warmtegetal is 1/opwarmsnelheid =cal/cm³K.

7. Meting van de uitzetting van een metalen pijp (holle pijp, stoom, meetklok).
Opstelling: Zie volgende pagina.

Bepaal door berekening de uitzetting per meter per graad.



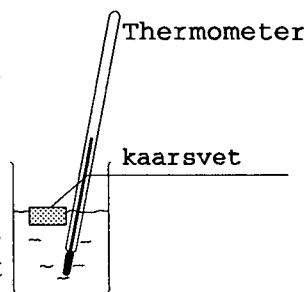
Figuur 29

8. Kaarsvet in water en het smeltpunt bepalen.

Doe in een klein bekglas (100 cm³) water en een stukje kaarsvet.

Opstelling:

Meet de temperaturen van het water en bepaal zo nauwkeurig mogelijk wanneer het kaarsvet gaat smelten.

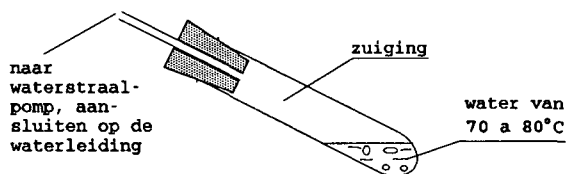


Figuur 30

9. Koken bij verlaagde druk.

Een grote reageerbuis met water verwarmen en met een waterstraal-pomp vacuüm zuigen. (Gaat uitstekend en is veilig).

Opstelling:



Figuur 31

Eerst het water verwarmen zonder stop en slang tot circa 100°C.

Daarna de brander weg, stop erop en zuigen met de waterstraalpomp.

10. De viscositeit van stroop bij verschillende temperaturen bepalen.
Meet de uitschenktijd bij verschillende temperaturen en maak een grafiek. Neem een schaalte met tuit waar steeds dezelfde hoeveelheid verwarmde stroop uitgegoten wordt.
11. Het vergelijken van spiritus, benzine en paraffine.
Schrijf overzichtelijk de volgende waarnemingen onder elkaar.

	spiritus - benzine - paraffine
kleur	
geur	
vloeibaarheid	
soortelijk gewicht	
ontvlambaarheid	
kleur bij verbranden	
vlamvormen	
vlamvormen met blaasbalg	
warmte die ontstaat	
roet en resten	

12. Smeltpunt van tin en lood bepalen en van hun legering (31% tin, 64% lood).
 Smeltpunt tin: 232°C
 lood: 327°C
 legering: 181°C.
13. Smelt in een pollepel lood en meet met behulp van een thermokoppel het smeltpunt. Idem met tin of zink.
 Smeltpunt lood: 327°C
 tin: 232°C
 zink: 420°C.
14. Dansende waterdruppels op een gloeiende plaat of in een koekepan.

4.4 Beeldvorming

Zoals in hoofdstuk 2 uiteengezet werd neemt in de achtste klas het beeldende denken over verschijnselen een belangrijke plaats in, terwijl in de negende klas een verschuiving plaatsvindt naar de meer abstracte begripsmatige benadering. Maar het vormen van beelden en het beeldend vergelijken blijft een belangrijke verrijking inhouden. Vooral de vergelijking tussen mens en verschijnsel is voor leerlingen steeds weer verrassend, sommigen krijgen dan pas toegang tot de lesstof. Van de vele mogelijkheden om tot beeldvorming in de negende klas te komen, worden hier drie voorbeelden geschetst die betrekking hebben op zelfontbranding, warmtegeleiding en warmtestraling.

Eerste voorbeeld van beeldvorming: zelfontbranding vergeleken met het ontwaken

In de ervaringsreeks rond de kaars (paragraaf 4.3.2) zijn we het verschijnsel zelfontbranding tegengekomen. Bij zelfontbranding van kaarsvet is de stof in zo'n beweeglijke (gasvormige en warme) toestand gebracht, dat de stof 'vlam vat'. De stof grijpt het vuur om verteerd te worden. In tegenstelling tot gangbare natuurwetenschappelijke opvattingen wordt het vuur hier gezien als een zelfstandige entiteit of kracht, die zich verbindt met de stof in omstandigheden die daar blijkbaar aanleiding toe geven. Het 'vuur' grijpt het vergaste kaarsvet en verteert het. Het vuur is niet het resultaat van chemische veranderingen, maar de chemische veranderingen zijn een resultaat van het vuur dat zijn werkzaamheid op de stof heeft uitgeoefend. Het vuur als aristotelisch element is een actieve willende kracht, die stofverandering teweegbrengt. Zo komt ook het menselijke bewustzijn niet uit de lichaamsprocessen voort, maar de lichamelijke afbraakprocessen zijn het gevolg van het bewustzijn. Tijdens de slaap is daarom herstel van het lichaam nodig. Als bij het ontwaken het bewustzijn zich weer met het lichaam verbindt, is dat een vergelijkbare situatie als bij zelfontbranding, waar het vuur of de warmte zich met de stof verbindt.

De vergelijking kan nog wat verder doorgetrokken worden: olie is moeilijk tot ontbranding te brengen, het moet eerst goed worden voorverwarmd. Sommige mensen ontwaken moeizaam, zij moeten eerst opwarmen! Dan zijn er ook de benzineachtige ontwakers: lieden die nog voor de wekker gaat fris als een hoentje uit bed springen!

Tweede voorbeeld van beeldvorming: warmtestraling en warmtegeleiding vergeleken met sympathie en antipathie

Warmtestraling en warmtegeleiding zoals zij als verschijnsel in paragraaf 4.3.3 en begripsmatig in 4.5 worden besproken, zijn met de psychische processen van de sympathie en de antipathie te vergelijken. Warmtestraling is een beeld voor de sympathie die een mens naar zijn omgeving uitdraagt. Vanuit sympathie is de mens sterk met die omgeving verbonden. Ook de warmtestraling laat zien dat een stof met zijn warmte-omgeving verbonden is. Zoals later in dit hoofdstuk nog zal worden uitgewerkt ontstaat warmtegeleiding doordat de stof de warmtesfeer terugstoot, zich voor de invloed van de warmte afsluit. Vanuit antipathie stoten wij ook iets uit de omgeving af en sluiten wij ons af voor de invloed die er van uitgaat.

Derde voorbeeld van beeldvorming: warmtestraling vergeleken met persoonlijke uitstraling

Een stralend voorwerp creëert een warmteveld om zich heen. Dit warmteveld moet niet stromend beschouwd worden, maar kan beter vergeleken worden met de persoonlijke uitstraling van een mens, met wat hem onderscheidt van anderen. Een voorwerp koelt af omdat het in stand houden van het warmteveld energie kost. De omgeving werkt zo op de warme voorwerpen in, dat de warmtevelden - evenals de koudevelden - onderdrukt, verteerd worden. Rudolf Steiner spreekt over de nijld van de natuur, van de omgeving, om verschillen te accepteren. Ook intermenselijk laat deze wetmatigheid zich gelden in racisme, ideologieën, afgunst, haat, enz. Bij de mens zou zich moeten verwezenlijken wat in de natuur vooralsnog onmogelijk is: het accepteren van individualisatie. Realiseert de mens zich als individu dan staat hij als monade, als wezen voor zichzelf, in de ruimte.

De anorganische natuur toont optima forma het 'collectivisme'. Om deze reden is een perpetuüm mobile niet mogelijk, omdat de natuur op zich zelf staande processen niet accepteert.

4.5 Begripsvorming

De negende klas leerling is op een leeftijd dat abstract denken mogelijk wordt. Voor een gezonde ontwikkeling van het denken is het wel noodzakelijk dat de leraar zich niet verliest in de abstractie. Begrippen

moeten stapsgewijs worden opgebouwd, waarbij nieuwe proeven zo gekozen worden, dat zij de aanzet geven tot de volgende stap in het denken. De verbinding met de verschijnselen mag nooit losgelaten worden.

Op deze leeftijd ontwikkelt zich het denken in oorzaak en gevolg. De leerlingen willen redeneren en zo hun denken scherpen. Ook hier ligt een valkuil: de leraar moet de oorzaken van de onderzochte verschijnselen niet materialistisch opvatten, maar fenomenologisch. Dit is zeker van belang bij het vormen van een goed begrip van warmte. In de gangbare wetenschap wordt warmte louter materialistisch opgevat (zie hierover paragraaf 4.9.6: warmteleer in historisch perspectief). Zou men leerlingen op deze leeftijd een dergelijk begrip bijbrengen, dan pleistert men de toegang dicht die de negende klasser normaal gesproken heeft tot de werkzaamheid van het geestelijke in de stoffelijke wereld.

Elk van de hierna beschreven voorbeelden is uitgebreider en diepgaander behandeld dan men in de klas zal kunnen doen. Dit is ook nodig om voldoende achtergrond te bieden. Wat uiteindelijk in de les behandeld kan worden zal van klas tot klas verschillen.

Eerste voorbeeld van begripsvorming: verbranding en zelfontbranding

Dit voorbeeld gaat in op de proeven met kaarsvet, die in paragraaf 4.3.2 staan beschreven.

Allereerst kan men de leerlingen proberen vertrouwd te maken met het verbrandingsproces in de kaars. Wat is de grijze en wat de zwarte rook? Zo ontdekken de leerlingen zelf het oorzakelijk verband, dat de warmte, die in de vlam gedurig ontstaat, het vaste kaarsvet laat smelten en vervolgens laat verdampen tot grijze rook, terwijl de zwarte rook de verbrandingsrest is.

De vlam die ijler is dan de omringende lucht heeft een zuigende werking op de lucht maar ook op de kaarsvetsdamp. De vlam zuigt het kaarsvet uit zijn starheid en vervluchtigt het in de ruimte. Het dynamische verbrandingsproces onderhoudt zichzelf. Zijn alle voorwaarden vervuld, dan kan het proces zich voortzetten. Ontbreekt voor een ogenblik bijvoorbeeld de zuurstof uit de lucht, dan is de vlam weg. Bij de zelfontbranding is het kaarsvet in zo'n beweeglijke toestand gebracht, dat het verterende vuur de damp kan vatten. In de Nederlandse taal bestaat de uitdrukking 'vlam vatten'. De vlam grijpt de stof en de stof geeft zich om verteerd te worden door de vlam.

Wat bij de kaarsvlam één geheel is, wordt in de proef met de grote reageerbuis uit elkaar gelegd: het kaarsvet wordt met een aparte warmte-

bron gesmolten en vervolgens verdampt tot grijze rook, terwijl wat in het voorgaande werd beschreven als vlam vatten bovenin de reageerbuis plaatsvindt. De voorwaarde voor zelfontbranding kan hier worden vervuld: het kaarsvet kan onder in de reageerbuis naar believen heet gemaakt worden.

Zoals in paragraaf 4.4 ten aanzien van de beeldvorming over deze processen al werd uiteengezet, wordt het vuur of de warmte die bij de verbranding ontstaat hier gezien als een zelfstandige entiteit, de zich met de stof verbindt als de omstandigheden daartoe aanleiding geven. De chemische veranderingen die tot uitdrukking komen in het verdwijnen van de grijze en het ontstaan van de zwarte rook zijn het resultaat van het ingrijpen van de warmte'kracht' en niet omgekeerd, wat de gangbare zienswijze is. De vlam is de plaats waar de warmte verschijnt in de ruimte. Lucht en kaarsvetdamp worden aangezogen om op te gaan in het verderende vuur.

In de verdampings- en verbrandingssnelheid komt de mate waarin het hele proces zich voltrekt naar voren. De gestiek, de wilsrichting van het proces, ligt een laag dieper. Het gas en de lucht willen zich overgeven aan de vuurkracht, offeren zich als het ware aan het verderende en omvormende vuurelement. Verbrandingsprocessen kunnen daarom 'mee'processen worden genoemd. Er vindt echter ook een 'tegen'proces plaats in de vorm van een afkoelende werking door de omgeving, de kaars en de verdampingsprocessen. Het ontstaan van as is een weer terugkeren naar de vaste stof; deze assen worden echter niet snel door de natuur opgenomen. Het licht en de warmte die bij het verbrandingsproces ontstaan verhouden zich polair tot de ontbrandbare gassen en de as. Het is de tegenstelling tussen imponderabele en ponderabele krachten, tussen perifeer en centraal gerichte tendensen. De verschillende processen die hier werden genoemd komen in paragraaf 4.6 en 4.9.5 in meer algemene zin aan de orde.

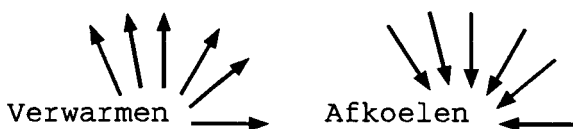
Met de voorgaande beschrijving zijn twee zaken expliciet naar voren gehaald:

1. De warmte is een zelfstandige natuurkracht.
2. Verbranding is een dynamisch proces waarbij de vraag gesteld is naar de tendensen, naar de wilsrichting van de stoffen in het proces. Primair is verbranden als een meep proces gekarakteriseerd, waarbij het gas en de zuurstof in offerende overgave opgaan in de warmte.

Tweede voorbeeld van begripsvorming: uitzetting en temperatuur

Dit voorbeeld gaat in op de proeven ten aanzien van uitzetting en temperatuur die beschreven staan in paragraaf 4.3.3 (zie blz. 64 e.v.).

Wanneer een stof van temperatuur verandert, wordt zijn volume groter bij verwarming en kleiner bij afkoeling. De stof gaat met de dynamiek van de warmte of koude mee. De dynamiek van warmte is uitbreiding, oplossen, smelten, bevrijding. Die van de koude, inkrimpen, verharding, kristallisatie en dergelijke. Niet alleen in de natuur maar ook psychologisch is deze dynamiek van kracht: warmte maakt de mens vrolijk, open en meegaand; door kou trekt de mens zich in zichzelf terug. De gestiek van de warmte is vanuit een centrum gericht op de periferie. Voor de koude is de gestiek juist omgekeerd.



Figuur 32

Ook in de fase-overgangen van gas-vloeibaar-vast komt dit tot uitdrukking. Gassen gaan het gemakkelijkst met de warmte mee, vloeistoffen en vaste stoffen veel minder gemakkelijk. Vaste stoffen zijn het verst gemancipeerd van de perifeergerichte tendens van de warmte. De vaste stoffen vallen het meest uit de alles doortrekkende warmte. Zij zijn in hun vormvastheid het meest op zichzelf gesteld. De gassen zijn nog grotendeels één met de warmte.

Het fenomeen van de *warmtegeleiding* laat ook duidelijk de sterke verbondenheid van de gassen met de warmtetendens zien. Men spreekt van warmtegeleiding wanneer de warmte door de stof trekt zonder deze mee te nemen of in stroming te brengen. Het gas is nog zo sterk één met de warmte dat de warmte er nauwelijks doorheen kan trekken.

Door nu de inkrimping/uitzetting per graad te bepalen komen de verschillen tussen de aggregatietoestanden tot uitdrukking. Het overzicht in tabel 1 geeft de volumeveranderingen in promille per graad temperatuurverandering. Uit dit overzicht valt op te maken, dat *alle gassen* op dezelfde intense manier met de warmtetendens meegaan. Bij vloeistoffen en vaste stoffen heeft elke stof zijn eigen uitzettingscoëfficiënt, wat betekent dat deze stoffen allemaal in hun eigen mate met de warmtetendens meegaan. Daarbij valt op dat de uitzetting van water vergelijkbaar is met die van vaste stoffen.

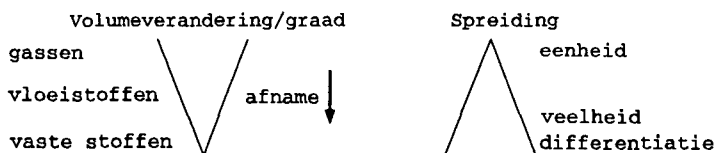
Tabel 1: Uitzetting van de stof in de verschillende fasen

	Uitzettings- promillage per volume een- heid (‰/°C)	gemiddelde waarde in promille per graad	verhouding grootste/ kleinste in één fase*	verhouding uitzettings- coëfficiënt gas en de andere fasen**
Alle gasen	3,66	3,66	1	1
Vloeistoffen				
siliconenolie	1,6			
aceton	1,5			
alcohol	1,1			
glycerol	0,5			
algemeen	0,5-1,7	ca. 0,7	ca. 3,5	ca. 5
water	0,21			17,4
Vaste stoffen				
kwarts	0,0012			
glas	0,0023			
plexiglas	0,0024			
asfalt	0,6			
pvc	0,72			
wolfraam	0,014			
staal	0,036			
natrium	0,21			
kalium	0,24			
metalen	0,015-0,24	ca. 0,045	ca. 16	ca. 80
algemeen	0,0012-0,64	ca. 0,010	ca. 530	ca. 366

Toelichting:

- * Voor de waarden in de vierde kolom deelt men het grootste door het kleinste promillage van de betreffende fase. De verkregen waarde geeft aan hoe groot de spreiding der promillages is binnen een bepaalde fase.
- ** Voor de waarden in de vijfde kolom deelt men het promillage van de gasfase door het promillage van de betreffende fase. Dit getal geeft de mate aan, waarin de uitzettingscoëfficiënt van de betreffende fase kleiner is dan die van de gasfase.

De mate waarin de uitzetting voor verschillende stoffen in een bepaalde fase verschilt (de spreiding) wordt naar de vaste stof toe groter, terwijl de uitzetting kleiner wordt.



Figuur 33

Voor een aantal vaste stoffen is in tabel 2 de uitzetting met enkele andere eigenschappen in verband gebracht.

Tabel 2: Uitzetting vaste stof

	smeltpunt	lineaire uitzetting promillage	volume- toename van 0 Kelvin tot smeltpunt	volume- toename bij het smelten
	(Kelvin)	(%/°C)		
Kalium	336	0,083	8,4 %	
Tin	505	0,033		3,6 %
Lood	601	0,029	5,2 %	
Zink	693	0,029		4,2 %
Aluminium	932	0,024	6,9 %	8,5 %
Zilver	1235	0,018		7 %
Goud	1337	0,014		7 %
Koper	1356	0,017	6,9 %	7 %
IJzer	1812	0,012	6,5 %	7 %
Wolfraam	3650	0,0045	5 %	

Wat allereerst opvalt is dat het uitzettingspromillage groter is voor stoffen met een lager smeltpunt. Verder geldt voor alle eenvoudige stoffen de regel van Grüneisen: de toename van het volume van de stof bij verhitting van nul Kelvin tot het smeltpunt bedraagt ruwweg 7%. Overigens is dit globaal ook de volumetoename bij het smelten van veel

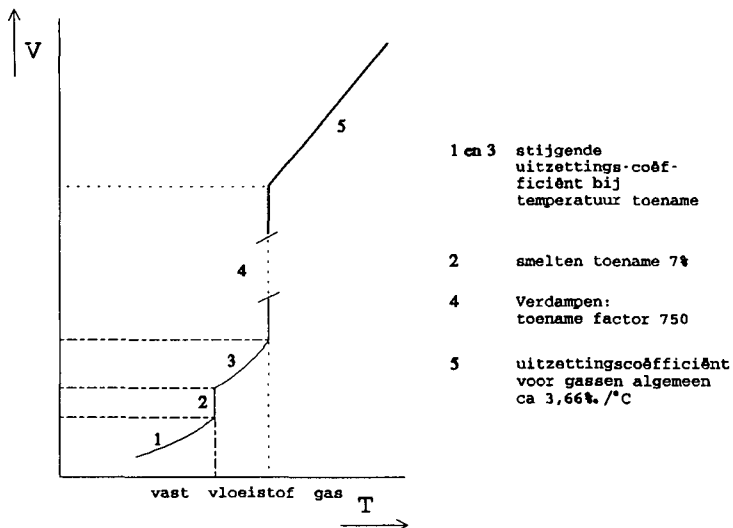
metalen. Verder is de volumetoename bij het smelten klein vergeleken bij die van de verdamping. Hieronder een overzicht voor enkele gassen:

Tabel 3: Gassen

	Volumetoename- factor bij verdam- ping	Kookpunt (K)
Neon	1337	27
Lucht	666	80
Kooldioxide	586	195
Butaan	225	233
Chloor	456	239
Ammoniak	887	240
Water	1666	373

Dus wanneer water verdampt dan wordt zijn volume 1666 keer groter, terwijl een blokje koper maar 1,07 keer groter wordt wanneer het smelt.

We vatten het hele beeld van de uitzetting van een stof samen in een V/T diagram, dat karakteristiek is voor vele stoffen:



Figuur 34

Behalve dat stoffen uitzetten bij verhitting veranderen er ook andere eigenschappen van de stof. Volgens de Aristotelische wereldbeschouwing liggen aan alle verschijnselen drie krachtsystemen ten grondslag, die ideëel te doorgronden zijn: de ruimte, de materie (zonder eigenschappen gedacht) en de eigenschappen. De eigenschappen en de materie zijn onruimtelijke krachten. Pas wanneer ze elkaar doordringen ontstaan ruimtelijke stoffen. De warmtekwaliteiten die tot uitdrukking komen in allerlei warmte-eigenschappen zijn *onruimtelijke krachtsferen* die zich aan en in de stof uitdrukken. Deze krachtsferen zijn als het ware *om* de stoffen heen. Wanneer we bijvoorbeeld bij zelfontbranding spreken van vlam 'vatten', dan kunnen we ook zeggen: de warmte 'vat' de stof. In de proeven valt te zien dat het vlamvatten van buitenaf geschiedt. De invloed van de warmtekracht en het werkingscentrum waar vanuit de warmtekracht zich openbaart, noemen we de warmtesfeer. Dit is een veelomvattend begrip, dat daarom in paragraaf 4.6 apart zal worden behandeld. Wanneer een vaste stof warmer gemaakt wordt, dan ziet men aan de toename van de volumecoëfficiënt dat de warmtekrachtsfeer steeds sterker aangrijpt. Dan volgt het smelten en werkt de warmtesfeer zeer sterk op de stof in zonder dat de temperatuur toeneemt. Daarna is de volumecoëfficiënt met een sprong toegenomen en wordt de verbinding en werkzaamheid van de warmtesfeer steeds groter. Door voortgaande afkoeling neemt de volume-afname af (grafiek figuur 34). Het volume wordt nooit nihil maar nadert bij 0 Kelvin een kleinste waarde. Dit laat zien dat de warmtesfeer de stof nooit helemaal loslaat. De stof blijft altijd in het werkingsveld van de warmtesfeer.

De materie heeft een samenballende, emanciperende tendens en de warmtesfeer een verijlende, oplossende, éénwordende tendens. De warmtesfeer werkt als een actief principe op de passieve materie, zoals dit tot uitdrukking komt in de volumeverandering van iedere stof wanneer de temperatuur verandert.

éénwording



emancipatie

Aan de fenomenen van de inkrimping/uitzetting zijn nu de begrippen 'emancipatie' en 'éénwording' ontwikkeld die ook psychologisch goed navoelbaar zijn. Pas door een onwankelbare en niet meegaande houding ontstaat de individualiteit, zoals een vaste stof pas echt tot z'n recht komt

wanneer de volume- en vormvastheid zich door de warmte minimaal laten veranderen.

Een stof die veel uitzet/inkrimpt laat een sterke verwantschap met de warmtesfeer zien; het gas in optima forma. De vaste stoffen hebben allemaal een eigen verhouding tot de warmtesfeer en zijn sterker op zichzelf gesteld, de warmtesfeer werkt hierop niet zo sterk in.

Het temperatuurbegrip

Het begrip temperatuur is een manier om met een getal de warmte-toestand van een stof aan te geven. Immers stoffen gaan in een bepaalde mate met de warmte mee, hetgeen betekent dat deze stoffen op berekenbare wijze uitzetten bij het warmer worden. Binnen een bepaalde fase en binnen niet al te grote temperatuurverschillen is de uitzettingscoëfficiënt van een stof constant; water is hierop een duidelijke uitzondering. Thermometers zijn eenvoudige instrumenten om de warmtetoestand van stoffen te meten. De lineaire schaalverdeling, die o.a. Celsius hanteerde, geeft deze gestaag verlopende uitzetting weer. Zoals ook in paragraaf 4.9.6 wordt uiteengezet doet de schaal van Dalton beter recht aan de feiten, omdat de uitzetting feitelijk niet lineair verloopt. Tien graden van Dalton's schaalverdeling komen overeen met een volumetoename-factor van 1.0179, zodat $n \times 10$ graden overeenkomt met een volume $V = V_0 \times 1.0179^n$ (volume V_0 is het volume bij een temperatuur van 0° op Dalton's schaal). Dalton stelde voor om de waarden 32 en 100 met de schaal van Fahrenheit te laten samenvallen. E. Hegelmann* stelt een overeenkomstige schaalverdeling voor, maar kiest als overeenkomstige punten de waarden 0 en 100 volgens de schaal van Celsius. De temperatuur volgens deze schaalverdeling kan berekend worden met

$$T = 320,5 \ln \frac{T \text{ (in Kelvin)}}{273,26}$$

Volgens een dergelijke schaalverdeling wordt het nul-volume nooit bereikt, terwijl de temperatuur steeds verder daalt. Het temperatuursgebied van 1 tot 50 Kelvin komt bijvoorbeeld overeen met een temperatuur van -1800 tot -500 graden volgens de schaal van Hegelmann.

* E. Hegelmann in *Physik*.

Derde voorbeeld van begripsvorming: warmtecapaciteit of warmteverbondenheid

De proeven ten aanzien van dit thema staan beschreven in paragraaf 4.3.3 tweede voorbeeld. Uit de eerste van de proeven volgt dat olie 2,3 x zo snel in temperatuur stijgt als water. Dat wil zeggen: olie gaat 2,3 x sneller met de warmtetendens mee dan water (zie blz. 66/67).

De warmte die ontstaat bij de verbranding omgeeft de bekeerglazen en men mag aannemen, dat door goed roeren de beide volumina een overeenkomstige uiteenzetting hebben met de warmte. De warmtewerking van buitenaf is identiek en toch gaat de ene sneller met het warmteproces mee dan de andere. De opwarmsnelheid van de olie is 2,3 x groter dan van water. Daarmee is het begrip opwarmsnelheid direct vanuit de proef gegeven:

$$\frac{\text{Opwarmsnelheid olie}}{\text{Opwarmsnelheid water (=1)}} = \frac{\Delta T \text{ olie}}{\Delta T \text{ water}} = \frac{96}{42} = 2,3$$

Zijn de volumina niet gelijk dan moet ook de volumeverhouding toegevoegd worden (bijvoorbeeld proef 3):

$$\frac{\text{Opwarmsnelheid olie}}{\text{Opwarmsnelheid water (=1)}} = \frac{\Delta T \text{ olie}}{\Delta T \text{ water}} \times \frac{\text{Volume olie}}{\text{Volume water}}$$

De opwarmsnelheid van verschillende stoffen kan op deze manier bepaald worden. Voor vaste stoffen is het handiger om die in een vloeistof onder te dompelen en dan de eindtemperatuur te bepalen. Bijvoorbeeld:

Een blokje aluminium (90cm³) wordt (in olie) verwarmd tot 180°C en vervolgens in 179 cm³ water van 20°C gedaan. Na enige tijd roeren is de eindtemperatuur 55,5°C. Bepaal hoeveel keer aluminium sneller met de warmte/koude meegaat dan water.

Het basisfenomeen is dat na korte tijd het water en het aluminium blokje dezelfde temperatuur hebben. Een vereffening van temperaturen treedt op (dit wordt ook wel de nulde hoofdwet van de thermodynamica genoemd). De berekening van de opwarmsnelheid van aluminium verloopt als volgt:

$$\frac{\text{Opwarmsnelheid Al}}{\text{Opwarmsnelheid water (=1)}} = \frac{\Delta T \text{ Al} \times \text{Volume Al}}{\Delta T \text{ water} \times \text{Volume water}}$$

$$\frac{\text{Opwarmingsnelheid Al}}{1} = \frac{(180-55,5)}{(55,5-20)} \times \frac{90}{179} = \frac{124,5}{35,5} \times \frac{90}{179} = 1,75 \text{ t.o.v. water}$$

De overstap van opwarmingsnelheid naar hoeveelheid warmte vraagt extra zorg. Bij een opwarmingsnelheid van 1,75 is voor het opwarmen van aluminium $1/1,75 = 0,57$ maal minder warmte nodig om een gelijk volume water evenveel in temperatuur te doen stijgen. Deze breuk noemen we het warmtegetal. Historisch gezien is de eenheid van hoeveelheid warmte vastgelegd aan water. Men spreekt van een warmte-eenheid wanneer 1 cm^3 water van $14,5^\circ\text{C}$ tot $15,5^\circ\text{C}$ wordt verwarmd. Deze eenheid heeft de naam 'Calorie' gekregen.

$$\text{Warmtegetal} = \frac{1}{\text{opwarmingsnelheid}} \quad (\text{eenheid cal/m}^3 \text{ } ^\circ\text{C})$$

De eerder weergegeven berekeningen met de opwarmingsnelheid kunnen ook met het warmtegetal van een stof worden uitgevoerd. Het warmtegetal heeft een sterker begripskarakter dan de opwarmingsnelheid. Het warmtegetal voor water is ook 1. De berekening gaat als volgt:

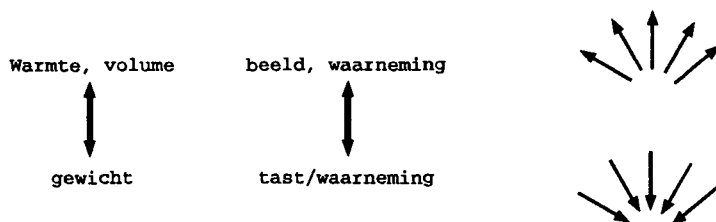
De hoeveelheid warmte die het blokje aluminium door vereffening afstaat (wegschenkt) is gelijk aan de hoeveelheid warmte die het water opneemt (ontvangt).

schenken (aluminium)	=	ontvangen (water)
warmtegetal x volume x ΔT	=	warmtegetal x volume x ΔT
w.g. x 90 x (180-55,5)	=	1 x 180 x (55,5-20)
w.g.	=	0,57 cal/cm ³ $^\circ\text{C}$

Gangbaar is het om het warmtegetal per gewichtseenheid uit te drukken. De belangrijkste overweging om het warmtegetal per volume-eenheid uit te drukken is de verwantschap tussen warmte en volume. Warmte en volume zijn direct aan elkaar gerelateerd: denk aan de uitzetting en aan de wet van Gay Lussac: $V/T = \text{constant}$.

Een polariteit van het volume is het gewicht. Het volume wordt vooral waargenomen door het oog, het beeldzintuig bij uitstek. Het gewicht kan alleen beleefd worden via lichamelijk contact. Hoe verrassend is het toch steeds weer om een flesje kwik vast te houden, een klompje goud is nog spectaculairder.

Vanuit de oerpolariteiten van de ruimte behoort het volume bij de perifere werking en het gewicht bij de centripetale materiewerking.



Figuur 35

De verwantschap tussen warmte en volume is van doorslaggevende betekenis geweest om de berekeningen per volume-eenheid uit te voeren en met goed resultaat.

Ook in de achtste klas is het veel aanschouwelijker om met soortelijk volume te werken dan met soortelijk gewicht. De proeven en berekeningen met betrekking tot de wet van Archimedes worden hierdoor ook veel toegankelijker. Zo heeft bijvoorbeeld een lichtere stof een groter soortelijk volume en dus een sterkere periferie-gerichte tendens, wat tot uitdrukking komt in een grotere opwaartse kracht.

Een praktische reden is nog dat het warmtegetal per volume minder afhankelijk is van de temperatuur.

Voorbeeld voor aluminium.

Tempe- ratuur	Warmtegetal per gram	Warmtegetal per cm ³
293 K	C=0,88 J/g.K	C=2,37 J/cm ³ K
2000 K	C=1,1 J/g.K	C=2,65 J/cm ³ K
	1,25x	1,12x

In tabel 4 is een overzicht gegeven van de opwarmsnelheid en van het warmtegetal voor verschillende stoffen. Ter vergelijking zijn ook de warmtegeleiding en de uitzetting van deze stoffen gegeven.

Nu volgt een nadere beschouwing van de begrippen opwarmsnelheid en warmtegetal. De opwarmsnelheid geeft weer in welke mate de

Tabel 4: *De opwarm snelheid in vergelijking met warmtegeleiding en uitzetting*

	Opwarm- snelheid t.o.v. water voor gelijke volumina	Warmtege- tal t.o.v. water voor gelijke volumina	Warmte- geleiding t.o.v. water	Volume uitzetting t.o.v. water	Volume uitzetting promillage ‰/°C
Water	1	1	1	1	0,21
Bakolie	2,76	0,36	0,28	3,4	0,72
Alcohol	2,37	0,42	0,28	5,2	1,1
Kwik	2,2	0,45	17,3	0,85	0,18
Glycerol	1,36	0,73	0,48	2,4	0,5
Helium	4604	0,00022	0,24	ca.17,4	3,66
Waterdamp	3548	0,00028	0,026		
Waterstof	3248	0,00030	0,29		
Lucht	3240	0,00030	0,040		
Aardgas	2650	0,00037	0,048		
Chloor	265	0,0037	0,013		
Kurk	10,45	0,095	0,18	-	-
Droogzand	3,26	0,3	1,66	-	-
Diamant	2,4	0,41	275	0,02	0,004
Plexiglas	2,32	0,43	3,2	1,14	0,24
Glas	1,91	0,52	1,55	0,11	0,024
Basalt	1,54	0,64	1,66	-	-
Is	2,0	0,5	3,5	0,71	0,15
Lood	2,84	0,35	58,3	0,41	0,086
Tin	2,48	0,40	108	1,31	0,276
Kwik	2,2	0,45	17,3	0,85	0,18
Aluminium	1,75	0,57	367	0,34	0,071
Goud	1,66	0,60	560	0,2	0,04
Zilver	1,65	0,60	700	0,27	0,057
Zink	1,55	0,64	183	0,42	0,088
Koper	1,2	0,83	650	0,24	0,05
IJzer	1,15	0,86	125	0,17	0,036
Kobalt/nik- kel	1,02	0,98	162	0,22	0,046
Nikkel	1,02	0,98	146	0,21	0,044

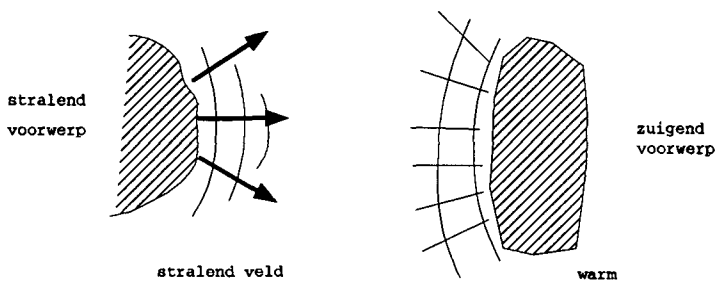
stof met de warmtetendens mee wil. De gassen zijn per volume-eenheid heel sterk met de warmte verbonden. De gassen laten de werking van de warmte heel goed zien: aan het gas kan men in *beeld* zien wat de warmte doet. Aan het warmtegetal wordt zichtbaar in hoeverre een stof 'zichzelf wil blijven', niet aan de warmtewerking wil beantwoorden. Hoe hoger het warmtegetal des te lager de opwarmsnelheid, dus hoe sterker de stof zijn temperatuur en volume wil handhaven. De geëmancipeerdheid van de stof ten opzichte van de warmtesfeer komt hierin tot uitdrukking. De stoffen met het grootste warmtegetal zijn water, ijzer, nikkel en kobalt (zie tabel). Water, als transparante vloeistof, heeft wel een grote verwantschap met het licht, maar is ten opzichte van de warmtesfeer het verst geëmancipeerd. Dit komt ook tot uitdrukking in het ondoorzichtig zijn voor warmtestraling en in de relatief grote warmtegeleidingscoëfficiënt van water.

Traditioneel gebruikt men voor het warmtegetal het begrip warmtecapaciteit. Dit doet teveel denken aan de stof binnen zijn uiterlijke grenzen. Hier gebruiken we liever het begrip warmteverbondenheid, waarin de verbondenheid met de warmtesfeer, die onruimtelijk aanwezig is, tot uitdrukking komt.

Vierde voorbeeld van begripsvorming: warmtestraling

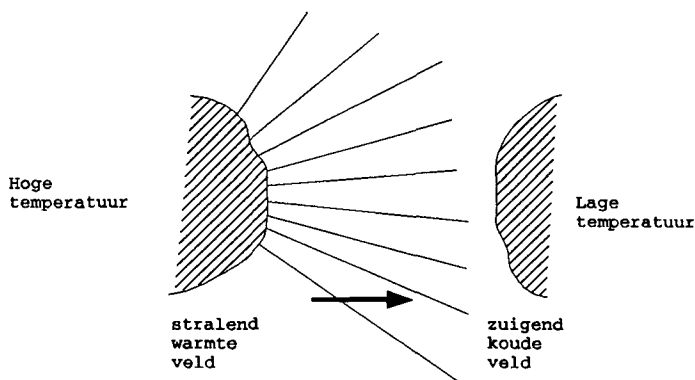
De proeven hierbij vindt men in paragraaf 4.3.3 derde voorbeeld (zie blz. 67 e.v.). Bij het verschijnsel warmtestraling kan men een onderscheid maken tussen bestraling -waardoor voorwerpen warm worden - en uitstraling - waardoor voorwerpen afkoelen. In 1860 stelde G. Kirchhoff: 'De verhouding tussen absorptie en emissie is voor alle ondoorzichtige voorwerpen bij dezelfde temperatuur gelijk.' Straalt een voorwerp relatief weinig uit, dan wordt het ook relatief weinig warm bij bestraling. Zo zullen transparante stoffen niet snel warm worden, echter ook nauwelijks stralen. Voorbeelden: glas, gas en fosforzure natron, dat nauwelijks gloeit, daar het doorzichtig blijft. Een brandglas wordt niet warm, maar het beschenen dof zwarte stuk papier vliegt in brand.

Ondoorzichtige voorwerpen worden het snelst warm. Hierbij speelt alleen het oppervlak een rol, materiaaleigenschappen hebben geen directe invloed op het stralingsverschijnsel. Glanzende, gladde of witte voorwerpen zoals isolatiefolie, spiegelend glas, thermoskan en witte lichte kleding houden de stralingsruimte in stand, terwijl doffe, ruwe, zwarte oppervlakken het stralingsveld wegzuigen en zelf warm worden.



Figuur 36

Zowel een stralend als een absorberend, zuigend, voorwerp laten een ruimte om zich heen ontstaan met een bepaalde structuur en een bepaald karakter. Een warmteveld - stralend of zuigend - is radiaal gericht en is alleen aanwezig tussen een stof met hoge en een stof met lage temperatuur. Het karakter van het veld is de vereffening van de temperatuurverschillen. Het vereffeningsveld is niet (zoals een elektrisch of magnetisch veld) gericht op een ander voorwerp, maar is altijd gericht op het oneindige. Zowel het stralende als het zuigende voorwerp heeft een ruimtestructuur om zich heen dat een relatie laat zien met het oneindig verre vlak of beter het ideële vlak. Zie hierover paragraaf 4.9.4 projectieve meetkunde.



Figuur 37

Doffe zwarte oppervlakken hebben de grootste openheid voor de warmtestraling. Hun verbondenheid met het oneindig verre vlak is blijkbaar groot. Daarentegen zijn witte, glanzende voorwerpen het meest van de warmtestraling afgesloten. De stralingsfenomenen laten direct de relatie zien van de warmte met het oneindig verre vlak. Zoals de natuurlijke plaats van het vaste element de aarde is, van het vloeibare de aardbol, van het gasvormige de atmosfeer en het planetenstelsel, zo is de natuurlijke plaats van de warmte het oneindig verre vlak. De warmte streeft naar het onruimtelijke.

Vanuit de meetkunde wordt de ruimte als driedimensionaal gekarakteriseerd. Deze driedimensionaliteit komt tot uitdrukking wanneer door vlakken, lijnen of punten de ruimtestructuur ontstaat. Het gas is verwant aan het driedimensionale (het vult de ruimte), het vloeibare aan het tweedimensionale (dit komt onder meer tot uitdrukking in het vloeistofoppervlak) en het vaste drukt zich nog maar in één dimensie uit, die als lengte, hoogte en breedte meetbaar wordt. Een gas wordt uitgedrukt in liters of m^3 , een vast voorwerp in $l \times b \times h$. Een voortgezette dimensievermindering voert tot de nulde dimensie, die meetkundig tevoorschijn komt in het 'punt' en natuurkundig in de elektriciteit. De dimensievermeerdering naar de vierde dimensie overstijgt de ruimte en gaat over naar een over- of onruimtelijke dimensie. Sir William Crookes (1832-1919) noemde in de vorige eeuw de warmte de toestand van de vierde dimensie. Een natuurkundig voorbeeld hiervan is het volgende.

Tyndal (1820-1893) onderzocht de relatie tussen de uitstraling van een dof zwart voorwerp en zijn temperatuur. Hij vond dat een zwak rood voorwerp ($525^\circ C$) 11,7 x zwakker straalde dan een witheet voorwerp ($1200^\circ C$). L. Boltzmann interpreteerde dit in 1884 als volgt:

zwak rood: $525^\circ C$ $T_1 = \frac{273}{798} K$ $T_1^4 = 4,05 \cdot 10^{11}$	witheet: $1200^\circ C$ $T_2 = \frac{273}{1473} K$ $T_2^4 = 4,7 \cdot 10^{12}$
$T_2^4 / T_1^4 = 11,61$	

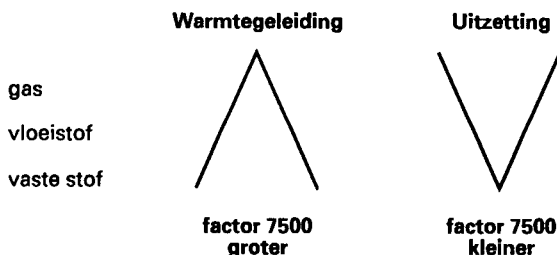
Bovenstaande berekening geeft weer dat de uitgestraalde hoeveelheid warmte (E) evenredig is met de temperatuur tot de vierde macht:

$$E \propto T^4.$$

Wanneer men bedenkt dat temperatuur gerelateerd wordt aan een lengte-uitzettingsgetal, dan staat T^4 dus eigenlijk ook voor de vierde dimensie. In de relatie tussen de temperatuur van het voorwerp en de intensiteit van het stralingsveld komt het beeld te voorschijn van het overruimtelijke. De warmtesfeer is nog omvattender dan de driedimensionale ruimte.

Vijfde voorbeeld van begripsvorming: warmtegeleiding

De proeven hierbij vindt men in paragraaf 4.3.3 vierde voorbeeld (zie blz. 68 e.v.). Kwantitatief komt uit de proeven naar voren, dat alleen sprake is van warmtegeleiding bij vaste stoffen en dan vooral bij metalen. Op bladzijde 96 is de tabel afgedrukt, waarin de warmtegeleiding voor verschillende stoffen is opgenomen naast de opwarmsnelheid en de uitzettingscoëfficiënt. De warmteverbondenheid van gassen is groot - het gas gaat gemakkelijk mee met de temperatuurveranderingen, vormt een éénheid met de warmtesfeer - terwijl de warmtegeleiding bij gassen klein is. Bij vaste stoffen treedt het omgekeerde op: de warmteverbondenheid is gering, vaste stoffen verzetten zich tegen temperatuurverandering, terwijl de warmtegeleiding juist groot is. Dit komt ook tot uitdrukking in de tegenstelling tussen uitzetting en warmtegeleiding. Dit is in schema gebracht:

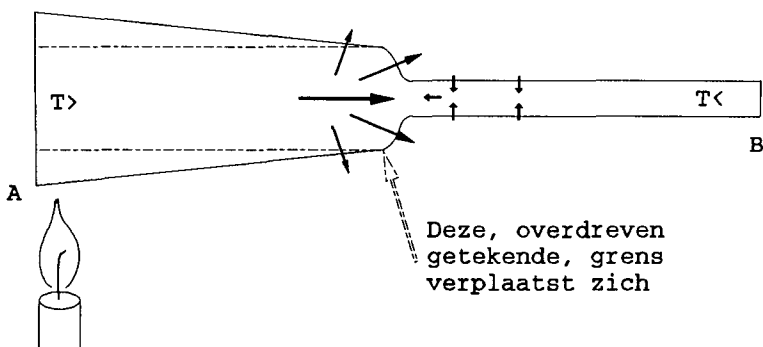


Figuur 38

Warmtestraling en warmtegeleiding zijn elkaars tegenpolen. In beide gevallen treedt temperatuurvereffening op, maar zoals we zullen zien op tegengestelde wijze. Ruimte, lucht, glas en water zijn transparant voor warmtestraling, terwijl zij juist isolerend werken bij warmtegeleiding. Zijn bij de warmtestraling het medium en de warmte wezensverwant, bij de warmtegeleiding zijn ze juist wezensvreemd ten opzichte van elkaar geworden. De warmtegeleiding is een weerstandsproces. Deze

weerstand moet niet als stromingsweerstand opgevat worden, maar zoals we zullen zien, als een dynamisch proces van vergaan en ontstaan van warmte. De volgende overwegingen hebben tot deze gedachte geleid:

1. Onderkoeld natriumthiosulfaat wordt bij kristallisatie warm. Als vloeistof is de stof nog vrij sterk met de warmtesfeer verbonden. Bij het kristalliseren emancipeert de stof zich van de warmtesfeer. Het ontstaan van de zogenaamde latente warmte is een uitdrukking van het zelfstandig worden van de stof ten opzichte van de warmtesfeer. De warmte maakt zich als het ware los uit de stof. De latente potentiële warmte wordt actueel meetbaar.
2. Wordt een staaldraad gebogen dan ontstaat warmte. Bij beweeglijkheid hoort een hogere temperatuur en een groter volume, ofwel een sterkere verbondenheid met de warmtesfeer, zoals het gas dat laat zien. De warmte die ontstaat bij het buigen komt tegemoet aan beweeglijkheid tijdens het buigen. Na het buigen treedt opnieuw de verstarringstendens van de vaste stof in werking en vereffent de ontstane warmte zich met zijn omgeving. Men kan dit proces, analoog aan het dynamo-effect in de elektriciteitsleer, warmte-inductie noemen.
3. Wordt de lucht in een afgesloten fietspomp snel samengeperst, dan zal de temperatuur van de samengeperste lucht stijgen. Wanneer de druk van een gas groter wordt, neemt de opwarmsnelheid af: het gas onder hoge druk heeft een geringere warmteverbondenheid en emancipeert zich van de warmtesfeer. Dit komt ook tot uitdrukking in een grotere warmtegeleiding van een gas onder hoge druk. Ook hier maakt zich de warmtesfeer los van de stof. Het volgende gezichtspunt kan nog verhelderend werken: wanneer een gas wordt samengeperst, ontstaat warmte als tegenproces, om de samenpersing van het gas te weerstreven. Het ontstaan van warmte gaat immers gepaard met uitzetting van het gas.
4. Een strook metaal wordt aan één kant verwarmd. Gaandeweg verplaatst de temperatuurgrens zich en daarmee de grens waar het metaal wel en niet is uitgezet. Zie figuur 39.



Figuur 39

Dit verschijnsel kan als volgt met de voorgaande fenomenen in overeenstemming gebracht worden:*

De staaf loopt van dik naar dun, overeenkomstig de temperatuurverschillen die aanwezig zijn. Vanuit A wil de warmtesfeer de stof steeds aangrijpen, maar de vaste stof verzet zich tegen de warmtesfeer en emancipeert zich ervan. B stoot de warmtesfeer dus af. Overeenkomstig aan de beschrijvingen onder 1, 2 en 3 ontstaat bij dit emancipatieproces tegenover de warmtesfeer uiterlijke warmte. Wanneer een stof van een koude in een warme omgeving geplaatst wordt en dus opgewarmd wordt, dan wordt de verbinding van die stof met de warmtesfeer sterker. Warmte verdwijnt dan als het ware in de stof, de stof vereenzelvigd zich ermee. Wordt omgekeerd de warmtesfeer afgestoten, dan ontstaat uiterlijke warmte.

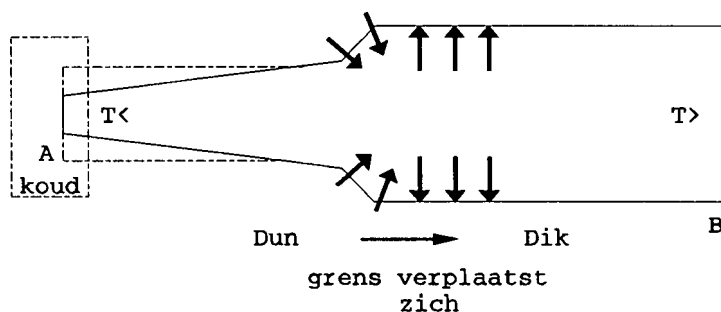
Wat normaal warmte'geleiding' genoemd wordt moet volgens deze zienswijze dus voorgesteld worden als een dynamisch proces van ontstaan en vergaan van warmte: Verwarmen A - uitzetting, dat wil zeggen het vergaan van de warmte in uiterlijke zin - B wil niet mee met de warmtesfeer en emancipeert zich ervan - uiterlijke warmte ontstaat als gevolg van deze emancipatie - enzovoort. In plaats van een voorgestelde calorische warmte die door een staaf stroomt, zoals water in een kanaal, is nu de relatie gelegd met andere verschijnselen waar warmte ontstaat en vergaat.

Grote warmtegeleiding, temperatuurvereffening, wil zeggen een sterke afkeer van de warmtesfeer, waardoor steeds weer warmte gegene-

* Zie ook R. Steiners warmtecurcus.

reerd, geïnduceerd wordt. Op deze wijze is de warmte niet alleen een resonantiesysteem van deeltjes en warmtegolven als gesloten systeem, maar staat dit verschijnsel in volle samenhang met de krachtsferen eromheen.

5. Een expanderend gas koelt af. Het ijlere gas heeft een grotere opwarmsnelheid en zal zich dus meer met de warmtesfeer verbinden. Waar bij compressie van een gas emancipatie van de warmtesfeer optreedt en uiterlijke warmte ontstaat, verbindt het gas zich bij het ijler worden meer met de warmtesfeer en ontstaat koude: de warmtesfeer zuigt zich de stof in. Ook hier kan men als volgt redeneren: het expanderende gas is conservatief en wil zijn volume handhaven. Het genereert koude als tegenproces om met de daarmee gepaard gaande inkrimping de expansie tegen te gaan.
6. Een strook metaal koelt af, door hem aan één kant in een koude omgeving te brengen (bijvoorbeeld in een bak zout ijswater van circa -15°C).



Figuur 40

Een overeenkomstige gedachtengang als bij punt 5 kan ook hier ontwikkeld worden. Door de koude maakt A zich los van de warmtesfeer. Daarmee krimpt A in. B is conservatief en verzet zich tegen dit losmaken uit de warmtesfeer. Op de grens tussen A en B wordt nu koude gegenereerd als uitdrukking van het gegeven dat B wil vasthouden aan de warmtesfeer. Ook dit proces moet dynamisch worden opgevat: Door afkoeling maakt A zich los van de warmtesfeer - B verzet zich hiertegen - koude ontstaat als uitdrukking van het vasthouden van de warmtesfeer van B - inkrimping ontstaat - enzovoort.

Deze gedachtengang is moeilijker te vatten dan bij 4 omdat het redeneren in termen van koude nog verder van het gangbare denken afstaat. Het woord warmtegeleiding verwijst naar een modelopvatting. Voor dit proces zou een andere naam gekozen kunnen worden, bijvoorbeeld warmte-inductie of temperatuurvereffening door warmte-inductie.

Voor de leerlingen maakt het een groot verschil of men zegt: 'de warmte stroomt er met weerstand doorheen' of dat men het ziet als een zich verplaatsend ontstaan en vergaan van warmte. Warmte genereren in plaats van transporteren. Leert men de werkingen van de warmtesfeer op de stof begrijpen, dan zal het ook gemakkelijker worden de ware aard van het denken van de mens te begrijpen. Dat men in het denken met de gedachtensfeer verbonden is, wordt als idee toegankelijker als men geleerd heeft in onruimtelijke krachtsferen te denken.

Zesde voorbeeld van begripsvorming: de gaswetten van Boyle en Gay Lussac

De proeven hierbij zijn te vinden in paragraaf 4.3.3 zie vijfde voorbeeld (zie blz. 70 e.v.). In de achtste klas is de tendens van de warmte en het gas reeds besproken. Deze tendens is oplossen, verwijderen, vermengen, streven naar eenheid. Wordt een gas samengeperst, dan wordt de druk c.q. het verlangen naar zijn 'natuurlijke plaats' des te groter naarmate het volume kleiner wordt. De tendens tot verwijling en verspreiding die het gas eigen is wordt hier dus in verband gebracht met de druk van een gas. Het centrum waar de gaswereld op gericht is, is de periferie. De druk - de gerichtheid op dit centrum - neemt toe, naarmate het gas verder van dit perifere centrum verwijderd wordt, dat wil zeggen naarmate het volume kleiner wordt. De drukverhouding is omgekeerd evenredig met de volumeverhouding:

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{V_2}{V_1}$$

Dit is de wet van Boyle; de meest abstracte formulering is:

$$\begin{aligned} P_1 \times V_1 &= P_2 \times V_2 \\ P_1 \times V_1 &= \text{constant} \end{aligned}$$

Bij toenemende temperatuur neemt de druk of het volume toe. Wordt de schaal van Kelvin als maat voor de temperatuur genomen, dan zijn beide verbanden lineair. Met andere woorden:

bij constant volume geldt:

de drukverhouding is evenredig met de temperatuurverhouding:

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{P_1}{P_2}$$

en bij constante druk geldt:

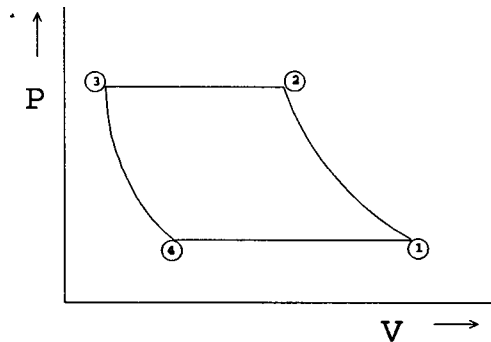
de volumeverhouding is evenredig met de temperatuurverhouding:

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{V_1}{V_2}$$

Dit is de druk- respectievelijk volumewet van Gay Lussac.

Deze drie relaties samen leiden tot de bekende gaswet: $\frac{P \cdot V}{T} = C$

Met deze wetten kunnen kringprocessen van gassen begrepen worden, zoals dat van een fietspomp:



Figuur 41

- | | | |
|------|-----|---|
| fase | 1-2 | Compressie van lucht |
| | 2-3 | Een uitlaatklep gaat open, het samengeperste gas wordt uit de cilinder gedrukt. |
| | 3-4 | Expansie van het overgebleven gecomprimeerde gas. |
| | 4-1 | Een inlaatklep gaat open; aanzuigen van het gas van lage druk. |

Er kan nu een berekening worden opgezet:

Stel de begintoestand van het gas op: $V_1 = 2 \text{ l}$, $P_1 = 1 \text{ bar}$, $T = 20^\circ\text{C}$.

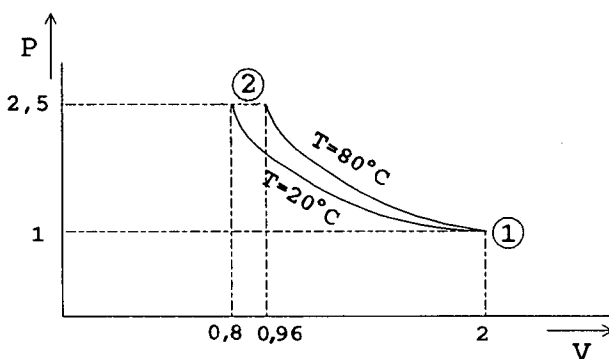
Door *langzaam* te persen zal de temperatuur niet stijgen. Is $P_2 = 2,5$ bar, dan kan V_2 berekend worden met $P \cdot V = C$

$$P_1 \cdot V_1 = P_2 \cdot V_2 \quad 1 \times 2 = 2,5 \times V_2 \quad V_2 = 0,8 \text{ l}$$

Wordt er *snel* gepompt dan loopt de temperatuur op tot bijvoorbeeld 80°C . V_2 wordt:

$$\frac{P \cdot V}{T} = C \quad \frac{2,5 \times V_2}{80 + 273} = \frac{1 \times 2}{20 + 273} \quad V_2 = 0,96 \text{ l}$$

In een PV-grafiek kunnen beide lijnen getekend worden:



Figuur 42

Van toestand 2 naar toestand 3 (zie figuur 41) wordt het gas naar buiten gedrukt. Stel dat het restvolume $V_3 = 0,2$ l is, dan wordt bij 80°C een hoeveelheid gas naar buiten gedrukt die als volgt kan worden berekend:

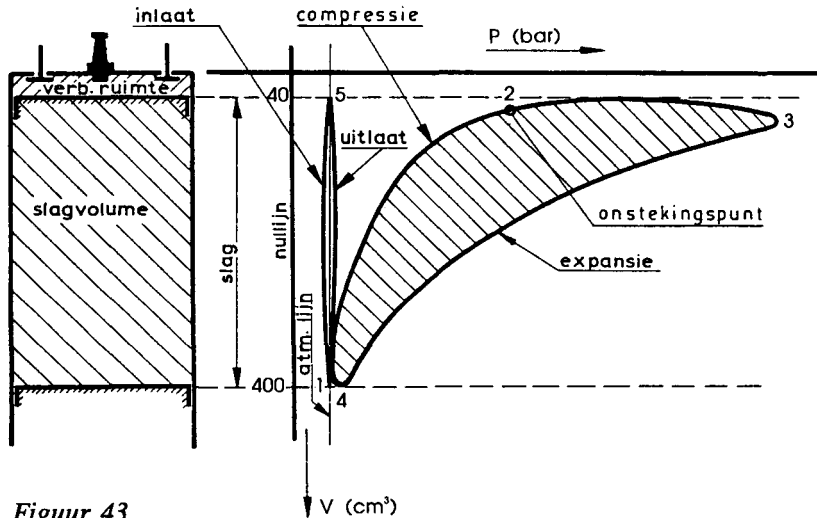
uitgestoten volume =

$$\frac{V_2 - V_3}{V_2} \times 100\% = \frac{0,96 - 0,2}{0,96} \times 100\% = 79\%$$

van de oorspronkelijke hoeveelheid.

De berekening van fase 3-4 en van 4-1 gaat op overeenkomstige wijze. Dit voorbeeld geldt niet voor alleen voor de fietspomp, maar ook voor de compressie van een koelmachine.

Eveneens kunnen berekeningen worden uitgevoerd ten aanzien van de 4-takt verbrandingsmotor. De verschillende fasen van het proces zijn in een indicateurdiagram aangegeven.



Figuur 43

1-2 Tijdens de compressie wordt bij stijgende temperatuur het lucht/benzine gasmengsel samengeperst.

Er geldt $\frac{P \cdot V}{T} = C.$

2-3 De ontsteking, iets voor het dode punt, laat druk en temperatuur sterk toenemen bij constant volume.

Er geldt $\frac{P}{T} = C.$

3-4 Expansie van het gas bij dalende temperatuur.

Er geldt $\frac{P \cdot V}{T} = C.$

4-5 De uitlaatslag.

5-1 De inlaatslag.

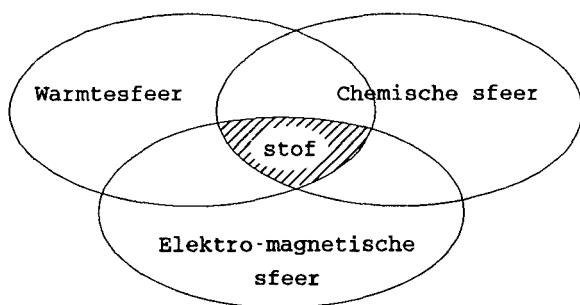
Berekeningen kunnen aan de hand van reëel gekozen getallen uitgevoerd worden:

4-takt benzine	$V_1 = 400 \text{ cm}^3$	$V_2 = 40 \text{ cm}^3$ (compressieverhouding 1:10)
	$P_1 = 1 \text{ atm}$	$P_3 = 25 \text{ atm}$
2-takt brommer	$V_1 = 50 \text{ cm}^3$	$V_2 = 8,25 \text{ cm}^3$ (compressieverhouding 1:6)
	$P_1 = 1 \text{ atm}$	$P_3 = 20 \text{ atm}$
Dieselmotor 4-takt	$V_1 = 400 \text{ cm}^3$	$V_2 = 20 \text{ cm}^3$ $P_2 = 20 \text{ atm}$ (compressieverhouding 1:20)
	$P_1 = 1 \text{ atm}$	$P_3 = 45 \text{ atm}$

Zevende voorbeeld van begripsvorming: de faseovergangen; afhankelijkheid van druk en zoutgehalte

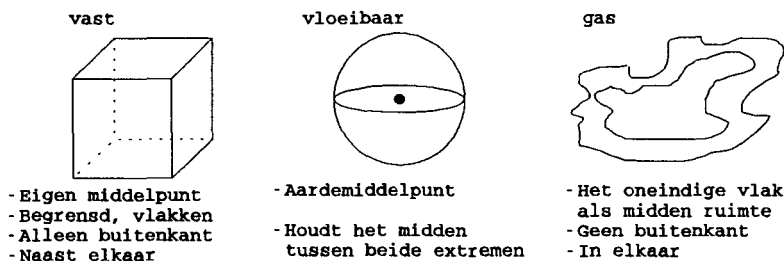
De proeven die bij dit onderwerp horen staan beschreven in paragraaf 4.3.2 vanaf de proef van Franklin (zie blz. 62 e.v.). Tijdens het smelten en verdampen vinden er hele grote veranderingen plaats onder inwerking van de warmte, de temperatuur verandert echter niet. Er verdwijnt zeer veel warmte in de stof, waardoor de stof als het ware een stuk in de warmtesfeer geheven wordt. De kristallisatiekrachten kunnen hierdoor niet meer werken en de stof wordt vloeibaar. Ook de vloeistofkrachten die tot verschijning komen in de meniscus en de volumevastheid moeten het opgeven bij voortgaande verwarming zodat damp, gas ontstaat. Door verwarming gaat een deel van de specifieke eigenschappen verloren. Ieder stuk stof is ingebed in krachtenvelden en krachtsferen. Een ding is niet een op zichzelf staand iets, maar is uitdrukking van krachtsferen. Zie figuur 44.

Door te verwarmen verandert de constellatie van eigenschappen die een uitdrukking zijn van deze sferen. Wordt bijvoorbeeld een stuk magnetisch ijzer verwarmd dan verliest het boven de curietemperatuur (bij ijzer bij 767°C) zijn magnetische eigenschappen. De krachtsfeer van het ferromagnetisme verliest zijn greep op de stof. Op overeenkomstige wijze is het sprongpunt bij de suprageleiding te beschouwen, alleen verliest dan een deel van de warmtesfeer z'n greep op de stof.



Figuur 44

Tijdens het smelten en stollen verliezen krachtencentra hun werking op de stof en andere gaan werken. Een kristal lost op en in de vloeistof zullen geen kristalvormende effecten meer te vinden zijn. Omgekeerd zal bij het kristalliseren deze krachtensfeer op zijn specifieke manier werkzaam worden door kubische of hexagonale of allerlei mengvormen (zoals bij alliages) te laten ontstaan. Van Romunde schrijft hier, in aansluiting op Steiners warmtecurcus, uitgebreid over in zijn boeken.* Een facet hiervan is door Rudolf Steiner als volgt verwoord: de vloeistof-vorm hangt samen met de aarde, het gas met kosmos en het vaste kristal heeft een eigen middelpunt.



Figuur 45

De relatie tussen de warmte/koude-toestand en de aggregaties is direct door de verschijnselen gegeven. Door verwarming wordt de hardheid en vormvastheid van een vaste stof kleiner. Uiteindelijk wordt de

* R. van Romunde: *Materie en warmte en Geluid, elektriciteit en magnetisme.*

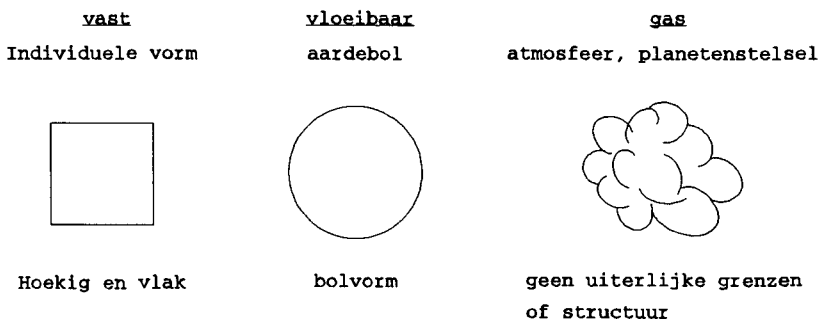
stof vloeibaar en wordt een meniscus gevormd. De viscositeit van de vloeistof wordt alsmaar kleiner en bij een bepaalde temperatuur verdampt de stof en gaat op in de ruimte. Bij toenemende temperatuur wordt het soortelijk volume van het gas en zijn viscositeit groter.

Enkele karakterisering van vast, vloeibaar en gasvormig zijn:

<i>gas</i>	onbegrensd	totale ruimte	in elkaar	elastisch
<i>vloeibaar</i>	meniscus	(aarde)bol	oplosbaar	volumevast
<i>vast</i>	begrensd	kristal	naast elkaar	vormvast

De vloeistof wordt gekarakteriseerd door de bolvorm die de grootste inhoud heeft bij het kleinste oppervlak. Een meer maar ook een bak water is georiënteerd op het middelpunt van de aarde. De vloeistoffen laten hun samenhang zien met de bolvorm van de aarde.

Zoals de vloeistoffen verwant zijn aan de aardebolvorm, zo is het gas verwant aan de onbegrensde atmosfeer en heeft de kristallijne vaste stof een individuele vorm. Ieder kristal, ook al is het van dezelfde structuur, heeft zijn specifieke vorm en gestalte. Het is een geïndividualiseerde specifieke vorm.



Figuur 46

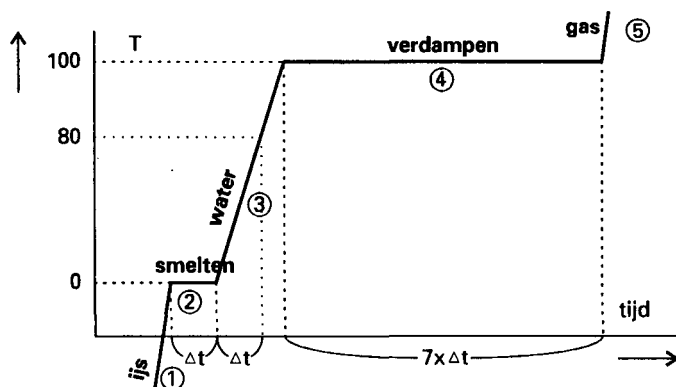
Bekijkt men nu hoe de warmte op de aggregaties werkt, dan is de vaste stof het meest onafhankelijk en de gassen zijn zo goed als één met de warmte. In beeld gebracht kan er dit als volgt uit zien (zie hiervoor ook paragraaf 4.9.5 over projectieve meetkunde):



Figuur 47

Het gas kan nog als *beeld* voor de warmte gezien worden. Warmte is niet in de ruimte zoals gas, maar doortrekt de ruimte met zijn werkzaamheid; hij is alleen binnenkant en is *in* alles.

Het smelten en kristalliseren zijn zeer dramatische processen die wij nauwelijks kunnen meebeleven, maar de warmtehoeveelheden en vormveranderingen die ermee gepaard gaan trekken zeer zeker onze aandacht. De smeltwarmte van ijs bedraagt 80 cal/cm^3 . Dit houdt in dat de sprong in de warmtesfeer die plaatsvindt bij het smelten overeenkomt met de toename in de verbinding met de warmtesfeer van water dat 80°C wordt verhit. Bij het verdampen is de sprong in de verbinding met de warmtesfeer ruwweg nog zeven maal zo groot (de verdampingswarmte van water is 540 cal/cm^3 !). Door nu ook nog de opwarmingsnelheid van ijs en stoom toe te voegen kan een tijd/temperatuurgrafiek gemaakt worden:

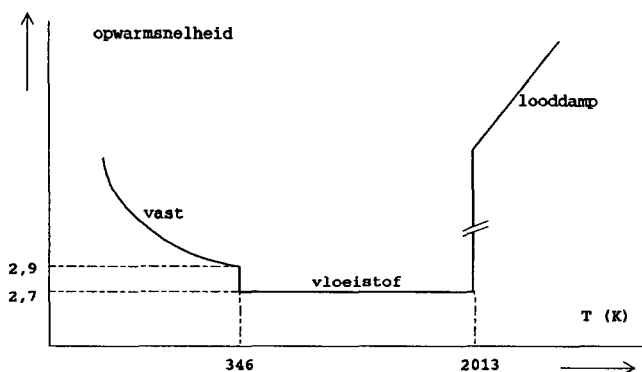


Figuur 48

Toelichting bij de grafiek: Zie volgende bladzijde.

1. IJs wordt twee maal zo snel warm als water, dus de stijtheid bij 1 is het dubbele van die bij 3 ($C = 0,5 \text{ cal/cm}^3$).
2. Het smelten van het ijs duurt net zo lang als het verwarmen van het water van 0° tot 80°C . Deze tijd noemen we Δt .
4. Het verdampen van het water kost 7 maal zoveel tijd als het smelten van het ijs.
5. De stoomlijn loopt zeer stijl, omdat het gas zeer gemakkelijk met de warmte meegaat ($C = 0,00028 \text{ cal/cm}^3$)

Terwijl bij het vergelijken tussen de elementen onderling bleek dat vaste stoffen het grootste warmtegetal hebben tegenover vloeistoffen en gassen, blijkt dit anders uit te pakken als we de warmtegetallen van de fasen van één stof bekijken, in dit geval van water. De vloeistoffase blijkt hier het moeilijkst met de warmtesfeer mee te gaan; deze fase heeft een groter warmtegetal dan de vaste stoffase. Water is daarmee geen uitzondering in de natuur, andere stoffen vertonen hetzelfde verschijnsel. Anders gezegd: de vloeistoffasen van stoffen hebben een kleinere opwarmingsnelheid dan de vaste stoffase. Een voorbeeld voor lood:



Figuur 49

Kookpunt- en vriespuntverschuiving

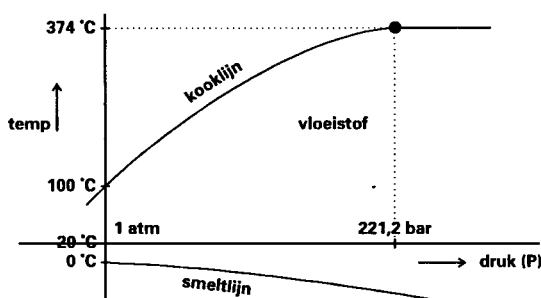
Uit de proef van Franklin, de pot van Papin, e.d. is gebleken dat bij toenemende druk het kookpunt hoger komt te liggen. De gasfase kan onder deze omstandigheden slechts bij hogere temperatuur gehandhaafd blijven. Bij afkoeling moet het gas eerder uit de warmtesfeer vallen door te condenseren tot vloeistof. Drukverhoging voert de stof dus sneller in de

verdichting als hij afgekoeld wordt. Blijkbaar gaat er een verdichtende werking van de hogere druk op het gas uit, waardoor de stof gestimuleerd wordt de dichtere vorm aan te nemen.

Overigens geldt hetzelfde ten aanzien van het stollen van stoffen, dat onder hoge druk ook al bij hogere temperatuur optreedt dan bij normale druk. Ook hier voert de drukverhoging de stof eerder in de verdichting. Water is met ijzer en bismut een uitzondering op de wet dat drukverhoging een smelt- en stolpuntverhoging oplevert. Zoals uit de proef met het blok ijs en het gewicht aan een staaldraad blijkt, ligt het vriespunt van water juist lager bij hoge druk. Dit hangt samen met de anomalie van water, met het gegeven dat bij water de vloeistoffase juist dichter is dan de vaste stoffase. Bij drukverhoging zal ijs dus juist al onder 0°C smelten, omdat het de dichtere fase, het kleinste volume opzoekt om zo mogelijk nog onder deze druk uit te komen.

Kritische druk en temperatuur; het tripelpunt

Het kookpunt van een stof neemt toe met de druk; dit gaat echter niet ongelimiteerd door. Water heeft bijvoorbeeld zijn hoogste kookpunt bij 374°C . De druk moet dan wel heel hoog zijn, namelijk 221,2 atm, anders verkookt het water zoals bij de proef van Franklin, wanneer de stop eraf vliegt. Boven de 374°C kan men de druk nog zo hoog opvoeren, de waterdamp zal nooit condenseren. Men noemt dit hoogste kookpunt de *kritische temperatuur*, de bijbehorende druk de *kritische druk*. In een druk/temperatuurgrafiek wordt de kooklijn vanaf dit punt horizontaal.

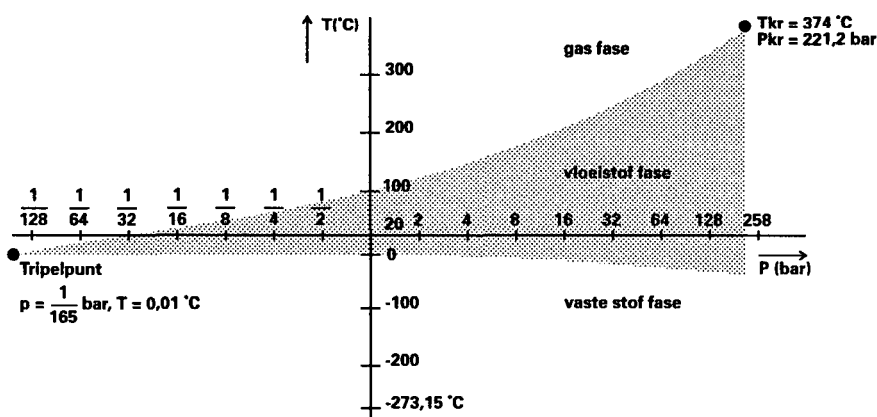


Figuur 50

Dit natuurfenomeen kan men als beeld zien voor het feit, dat ieder mens een optimisme-grens in zich draagt. Naarmate het enthousiasme, de levensdrang groter zijn, kan meer weerstand geboden worden tegen bedrukkende situaties. Soms kunnen mensen hun innerlijke kritische temperatuur zo hoog opvoeren, dat ze onder de grootste druk nog niet

bezwijken. Denk hierbij aan oorlogssituaties, marteling, opsluiting, isoleercellen en dergelijke. Licht de optimisme-grens laag, dan kan bij geringe tegenslag de hoop al omslaan in malaise en neerslachtigheid.

De smeltlijn loopt, behoudens bij de uitzonderingsgevallen water, ijzer en bismut, omhoog bij toenemende druk. Bij afnemende druk daalt het kookpunt; het smeltpunt daalt echter nauwelijks. Dit leidt ertoe dat kook- en smeltlijn elkaar bij afnemende druk steeds meer naderen en op een gegeven moment treffen. Bij water gebeurt dit bij een druk van $1/165$ bar. Het samenvallende kook- respectievelijk smeltpunt ligt in dit geval dan bij $0,01^\circ\text{C}$. Er is bij deze temperatuur en druk geen onderscheid tussen vast, vloeibaar en vast. Het is een unieke toestand, waar eigenschappen van alle drie de aggregaties in elkaar grijpen. We noemen dit punt het *tripelpunt* of *driefasenpunt*. Een grafiek brengt dit alles in beeld. Omdat absolute nuldruk niet te bereiken is, ontstaat een realistischer beeld als de druk met logaritmische schaal wordt weergegeven.



Figuur 51

Achtste voorbeeld van begripsvorming: de anomalie van water

Het water speelt op aarde in haast alle processen en verschijnselen een essentiële rol. De aarde, de atmosfeer, al het leven is doortrokken met water. Zonder water is de natuur verlaten en leeg. Water is de drager van het leven, de drager van alle levensprocessen die zich in de tijd afspelen.

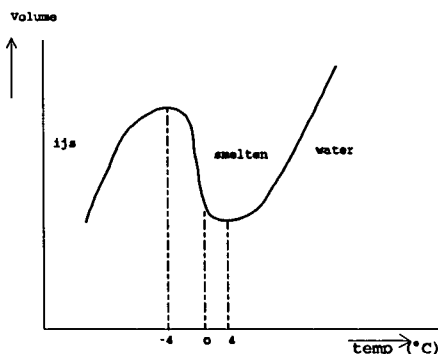
De universaliteit van water komt bijvoorbeeld te voorschijn in de atmosferische fenomenen zoals:*

⚡	ijsvorming	-	transparant kristallijn
⚡	sneeuw	-	grote verscheidenheid van zeshoekvormen
♂	hagel	-	kracht, verwoesting
☉	wolken	-	levendig vormenspel
♀	rijp	-	schoonheid
♀	regen	-	van vreugdevol tot striemende regenbuien
☂	nevel, mist	-	omhullend
⊗	water	-	leven

In het hele spectrum van de natuur heeft water een heel bijzondere plaats:

- het houdt het midden tussen zuren en basen;
- het is een uitstekend oplosmiddel;
- het is de basis voor vele colloïdale oplossingen (hydrosol; met alcohol ethersol);
- de capillaire werking is heel groot;
- het heeft een hoge warmtecapaciteit: de warmteverbondenheid - het meegaan met de warmtesfeer - is dus gering;
- tussen -4°C en $+4^{\circ}\text{C}$ wijkt zijn uitzettingsgedrag af van het normale patroon: de anomalie van het water.

Door zijn hoge warmtecapaciteit en door de anomalie is het water de grote regulator van de seizoenen. Iedere stof gaat met zijn volume met de warmte of koude mee. Alleen water, ijzer en bismuth verzetten zich rondom hun smelt/stolpunt tegen dit meep proces. Water doet tussen $+4^{\circ}\text{C}$ en -4°C niet aan dit oerproces mee.



Figuur 52

Door deze anomalie is leven op aarde mogelijk. Door zijn andere eigenschappen is water bij uitstek geschikt voor technische toepassingen, zoals waterkrachtcentrale, stoomturbine, verwarming, oplosmiddel, enzovoort.

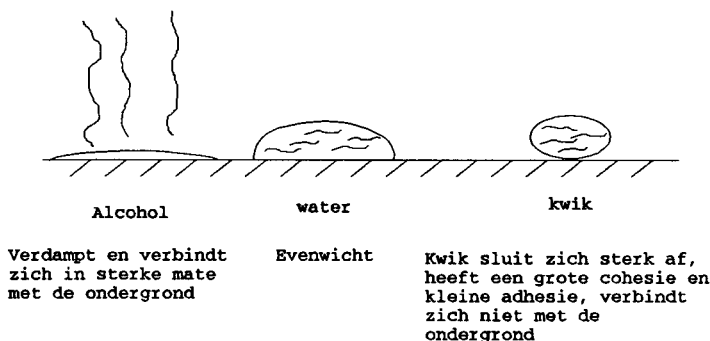
* De atmosferische fenomenen worden hier in verband gebracht met de planeten. Zie over het thema planeten en natuur o.m. *Metamorfose* van Frits Julius.

Dat het water bij afkoeling van $+4^{\circ}\text{C}$ tot -4°C uitzet, kan gezien worden als een verzet van de warmtesfeer tegen de algemene natuurten-dens. De gestaag afnemende greep van de warmtesfeer op substanties wordt hier doorbroken. Het is een soort shock, een dieper ingrijpen van de warmtesfeer die tot uitdrukking komt in de volumetoename. Gedurende de anomalie is er sprake van een tegenproces. Er is warmteafgifte en toch wordt het volume groter.

Door de anomalie van het water heeft ijs - als vaste stof - een groter volume dan de vloeistof. Hierdoor drijft niet alleen ijs op water - wat voor schaatsers aangenaam is - maar treedt ook erosie op doordat gesteenten bij vorst kunnen barsten onder invloed van de uitzettende kracht van het bevrozende water.

Ook in andere opzichten zijn de eigenschappen van water opmerke-lijk:

- Water staat tussen metalen en isolatoren. Metalen reflecteren radio-straling, isolatoren zijn er min of meer doorzichtig voor en water verzet zich tegen radiostraling. Radiostraling wordt vernietigd in water en warmte ontstaat: in een magnetron (2450 MHz) wordt vooral water warm. Het verzet van ijs is raadselachtig genoeg 500 x kleiner. Daarom gaat ontdooien langzaam en opwarmen relatief snel.
- Het smelt- en kookpunt ligt gunstig voor een stoommachine.
- Water is zeer stabiel, reukloos, onbrandbaar en neutraal van smaak.
- In de nauwste capillairen blijft de hechtheid, cohesie, behouden, terwijl ook de adhesie, het zich verbinden met de omgeving groot is. Een druppel water naast kwik en alcohol drukt dit uit.



Figuur 53

Rudolf Steiner bespreekt het water, zoals dat in de atlantische tijd was, in zijn Akasha-kroniek*. In de atlantische tijd waren atmosfeer en waterfase nog één. De huidige lucht is dunner en het huidige water dikker geworden ten opzichte van Atlantis. Maar ook toen was deze water-lucht atmosfeer de ideale voorwaarde voor de ontwikkeling van techniek. Steiner geeft aan dat het water in de toekomst nog een metamorfose zal ondergaan en in andere hoedanigheid aanwezig zal zijn met nieuwe nog niet aanwezige eigenschappen.

Water is het aarde-element bij uitstek. Het heeft zich het meest geëmancipeerd van de warmtesfeer - zoals tot uitdrukking komt in de (grootste) warmtecapaciteit - en is ver afgedaald in de verdichtende krachtsfeer - wat tot uitdrukking komt in de anomalie: de vloeistof heeft een grotere verdichtingsgraad dan de vaste stof. En toch heeft water ook een sterke licht-natuur, dit in tegenstelling tot ijzer en kobalt, die met water het meest van de warmtesfeer geëmancipeerd zijn, maar totaal niet transparant zijn voor licht. Water staat daarbij evenwichtig in alle krachtersferen en maakt ruimte om het leven tot verschijning te laten komen. Water dringt zich niet op maar opent wegen tot omvorming. Denk hierbij ook aan de zes kruiken water die tot wijn werden (Johannes evangelie) en aan het dopen met water.

Warmte, water en elektriciteit komen tot verschijning bij het onweer. Is het warm en ontstaat er een drukkende, broeierige atmosfeer, dan is het onder bijzondere condities mogelijk dat er onweer ontstaat. Onweer is een warmtefenomeen dat gepaard gaat met begeleidende elektrische fenomenen. Na het onweer is de benauwdheid weg. De druk die beleefbaar was is opgelost. De warmtesfeer van de aarde heeft ingegrepen door de ruimte open te scheuren. De opengescheurde ruimte gaat gepaard met elektrische verschijnselen aan de grens van de vacuumbuis.**

Bliksem is te vergelijken met iemand die langzaam boos wordt. Innerlijk is men boos en in lichaamsprocessen komt dit tot uitdrukking o.a. in veranderende huidspanningen. Dan slaat de persoon met z'n vuist op tafel. Hier is het duidelijk dat de aanzet tot het boos worden niet in de veranderende huidspanning ligt, maar dat alle lichaamsprocessen uitdrukking zijn van het *innerlijk* boos worden.

Zo kan dat ook bij het onweer gezien worden: alle processen zijn uitdrukking van stuwingen in de warmtesfeer, er ontstaat ook een gigantische hoeveelheid warmte en elektriciteit op het moment dat de wolk juist

* Rudolf Steiner: *Uit de Akasha-kroniek*.

** Zie ook Walther Bühler: *Nordlicht, Blitz und Regenbogen*.

helemaal tot ijs wordt. Het oplopen van de spanning gaat hand in hand met het bevriezen van de wolk. Is de wolk grotendeels tot een ijs/hagel-massa geworden, dan barst de ruimte open en ontstaat er warmte en ontstaat/vergaat er elektriciteit.

4.6 Ideeënvorming

Terwijl de begripsvorming in de negende klas periode centraal staat, neemt het ontwikkelen van ideeën een bescheidener plaats in. Immers, voor het vormen van ideeën, voor het vinden van samenhangen tussen meerdere fenomenen, is de negende klasser nog niet zo toegerust als een elfde of twaalfde klasser. Toch is het werken met en aan enkele ideeën van groot belang voor de negende klas periode. De vele begrippen als temperatuur, warmteverbondenheid, kookpuntverschuiving, etc. krijgen een samenhang door enige overkoepelende ideeën te ontwikkelen, waarbinnen deze begrippen een plaats kunnen krijgen. Een dergelijk idee heeft een zelfde soort functie als de staalconstructie voor een gebouw: alles krijgt verband. Enkele van zulke ideeën zullen in deze paragraaf nader worden uitgewerkt.

Terwijl in klas elf en twaalf heel expliciet aan het ontwikkelen van ideeën wordt gewerkt, kan dat in klas negen meer impliciet gebeuren. Telkens keert men weer even bij zo'n idee terug, waarbij men, afhankelijk van de situatie, kan proberen zo'n idee nog weer helderder te krijgen. Maar vaak wordt zo'n idee vanzelf voor leerlingen helderder door er vaker gebruik van te maken bij het belichten van verschijnselen.

Eerste voorbeeld van ideeënvorming: warmtesfeer, warmteveld en warmtefenomeen

Warmtefenomenen neemt de mens door zijn zintuigen waar. Het warmteveld is een begrip dat men gebruikt om de van warmtestraling doortrokken ruimte te beschrijven. Dit voert terug op het veldbegrip, zoals dit door Faraday in 1879 is geïntroduceerd.* Dit veldbegrip houdt in dat een werking op afstand - door de (lege) ruimte heen - plaatsvindt. Het geeft aan de ruimtelijk gescheiden objecten een door het denken gevatte samenhang. De mens kijkt nu met begrip de wereld in. Zoals

* Zie over Faraday paragraaf 5.8.2.

Rudolf Steiner in zijn boek *Filosofie der vrijheid* heeft duidelijk gemaakt, wordt de werkelijkheid gevat in een synthese van waarnemen en denken.

Bij de warmtesfeer kan men beter van een idee dan van een begrip spreken, omdat het een zoveel meer omvattend gezichtspunt inhoudt. Men kan dit gezichtspunt het beste benaderen door tot een krachtbegrip ten aanzien van de warmte te komen. Nu is het krachtbegrip in de hedendaagse natuurwetenschap in de loop der tijden gereduceerd tot wisselwerking tussen deeltjes en/of golven. Zo wordt gepoogd gravitatie te verklaren door gravitonen. Warmte te zien als natuurkracht, als entiteit, is geen eenvoudige opgave, omdat het denken in natuurkrachten nog ontwikkeld moet worden. Het vraagt om een voortdurende scholing om deze manier van denken tot ontplooiing te laten komen.

1. Een eerste stap in dit proces is, om naast de begrippen *ruimtelijk* en *tijdelijk* twee andere begrippen te hanteren bij het beschouwen van de verschijnselen, namelijk het *onruimtelijke* en het *eeuwig onveranderlijke* - datgene wat duur heeft. Zo zijn de krachten die aan de gestalte van de roos ten grondslag liggen zelf onruimtelijk en hebben eeuwigheidskarakter of duur. Ook de warmte van de verbranding van hout is een manifestatie van warmtekrachten, die onruimtelijk met het hout verbonden zijn.
2. Een tweede stap is niet alleen te denken in termen van chemische en energetische omzettingen, maar ook in *ontstaan* en *vergaan*. Zo ontstaat en vergaat een plant voortdurend, maar het zaadje blijft met de krachten die gestaltevormend werken verbonden. Wanneer voldoende voorwaarden in ruimte en tijd vervuld zijn ontstaat een nieuwe plant. Zo ontstaat ook de verbrandingswarmte, als de voorwaarden voor het verbranden van een stuk hout vervuld zijn. Het hout dat door vuur verteerd wordt is een zuigpunt voor het ontstaan van warmte uit de onruimtelijke krachtwereld.
3. Een derde begripsuitbreiding is om het abstracte punt- en puntcontact-denken aan te vullen met het synthetische denken van elkaar ontmoetende krachtrichtingen of *tendensen*.

Krachten hebben een tendens, een wilsrichting. Zo wil warmte graag ontstaan, maar het ecologische evenwicht reguleert de warmte-huishouding in de natuur. Een kracht is onruimtelijk. Ten aanzien van de warmtekracht kan men beter spreken van de onruimtelijke warmtewereld, waaraan Aristoteles onmiddellijk het begrip 'potentia' zou toevoegen, om aan te geven dat deze warmtewereld nog niet werkzaam is in het ruimtelijke en tijdelijke. Wij willen hier de naam *warmtesfeer* aan verbinden.

De wereld van krachten wordt doorgrond met het denken. Het denken is het waarnemen van het onruimtelijke en eeuwige. Met het ideële denken dringt men door in de krachtrichtingen die de fenomenen doortrekken. De idee of de kracht 'roos' kan zich tegelijkertijd op vele plaatsen manifesteren. Zo kan de warmtesfeer zich op oneindig veel manieren in de uiterlijke wereld van de ruimtelijkheid en tijdelijkheid doen gelden.

Warmteprocessen spelen zich af op het grensveld van het ruimtelijke en het onruimtelijke. De brandende kaars, die in paragraaf 4.5 nader werd belicht, geeft hiervan een goed voorbeeld (zie blz. 85). Het kaarsvet wordt van vast vloeibaar en ten slotte gasvormig door de warmte van de vlam. Het vaste isoleert zich het meest van zijn omgeving. Het vloeibare sluit zich nog gedeeltelijk af met een huid (oppervlaktespanning) en laat in zijn verschijning de samenhang met de gehele aarde zien - de vloeistofmensus volgt de aardkromming, een druppel wordt bolvormig -, terwijl het gasvormige de ruimte geheel wil vullen en daarbij andere gassen totaal doordringt. Het doordringingsvermogen van een gas in de ruimte is zelfs onafhankelijk van andere gassen in die ruimte (Dalton). Van vast via vloeibaar naar gasvormig: steeds treedt er uitzetting op en er ontstaat een steeds dynamischere activiteit.

Tot aan de gasvormige fase werd het brandbare kaarsvet meegevoerd door de warmte. Daarna werd het, al verbrandende, zelf zuigpunt voor de warmtesfeer.

De tendens die in het proces besloten ligt roept de vraag op: wat is nog omvangrijker dan het dynamische, ijle gas, dat reeds samenhangt met de hele ruimte? Dat is het onruimtelijke en eeuwige, dat de ruimte doortrekt en draagt, zoals bij de mens de ziel het lichaam doortrekt en draagt. De warmtesfeer is de oergrond waar alles ingebed is.

Het grensveld tussen ruimte en onruimtelijkheid is dus eigenlijk ruimtelijk gesproken het centrum van de werking van de warmtesfeer. Dit grensveld is wat in de projectieve meetkunde genoemd wordt het oneindig verre vlak. De verdichtende krachten die in de stof werkzaam zijn en die zich vooral in de vaste stoffen manifesteren, hebben ruimtelijk gezien een punt als centrum van werkzaamheid. Een vallende waterdruppel vormt zich als een bol rond het middelpunt of zwaartepunt van de stof. De oriëntatie van de vloeistof is tweëerlei: er is een gerichtheid op het zwaartepunt en op de periferie. Het gas daarentegen - daarvan getuigen gasdruk en verspreidingstendens - is vooral op de periferie georiënteerd.

De tegenstelling tussen krachten die als centrum van hun werkzaamheid het grensvlak hebben en krachten die vanuit een punt werken wordt in paragraaf 4.9 (projectieve geometrie) nader uitgewerkt.

Tweede voorbeeld van ideeënvorming: proces en tegenproces

Het is een algemene natuurwetmatigheid dat een eenmaal ontstaan natuurevenwicht zich wil handhaven. Sommige stoffen of toestanden van de stof blijven heel lang bestaan of veranderen maar weinig onder de invloed van processen van buiten af, bijvoorbeeld water als het verwarmd wordt. Vindt er een proces plaats waarbij de stof wél verandert, dan vindt er ook altijd een *tegenproces* plaats, dat de werking van het proces deels teniet doet.

Een enkel eenvoudig voorbeeld. Pers in een fietspomp lucht samen. De lucht zal warm worden, waardoor de lucht uitzet. Hierdoor zal de lucht minder sterk verdichten dan als het gas alleen aan het proces van de samenpersing zou zijn blootgesteld. Het warm worden van de lucht is hier dus een tegenproces. Iets dergelijks treedt op als een gas expandeert: het gas koelt dan af (tegenproces) om door samenkrimping de expansie van het gas tegen te werken.

Lost men zout op in water, dan daalt de temperatuur van het water, waardoor het oplopend vermogen ervan vermindert, zodat het opnemen van zout wordt tegenwerkt. Hier is temperatuurdaling het tegenproces. Wordt er dus uitgaande van een evenwichtssituatie door een proces een verandering van de stof bewerkstelligd, dan zal dit een tegenproces oproepen die er naar streeft de stof zo dicht mogelijk in de oorspronkelijke toestand te houden. Het fenomeen proces en tegenproces vindt men in de huidige natuurkundeboeken niet terug. Toch is het een algemeen erkende wet geweest. Door Le Chatelier (1884) en Braun (1886) is deze wet als 'het principe van de kleinste dwang' geformuleerd.

Naast de tendens om de oorspronkelijke toestand zoveel mogelijk te behouden, zal er ook een tendens in de stof aanwezig zijn om mee te gaan met de veranderende krachten. Zulk een tendens wordt een *mee-proces* genoemd. Het kaarsvet dat verbrandt, beweegt mee met het proces. Overeenkomstig de werking van de warmtesfeer wordt de stof eerst dynamischer en ijler (gasvormig) en geeft zich dan over om verteerd te worden door het vuur.

Soms vindt er naast deze tendensen om met de verandering mee te gaan of deze juist tegen te werken een proces plaats, dat tegengesteld van aard is. In het voorbeeld van de verbranding van kaarsvet is dit te vinden in het elektrisch worden van de kaarsvlam enerzijds en het ontstaan van licht anderzijds. Hierbij staan de elektriciteit en het licht polair tegenover elkaar. Dit punt zal in paragraaf 4.9.4 nog nader worden toegelicht.

Processen waarbij meep proces, tegenproces en *polair* proces alle drie plaatsvinden komen vaak voor. Het is goed de leerlingen een concreet voorbeeld aan te bieden dat dicht bij hun beleavingswereld ligt. Als

een leraar een enthousiast verhaal voor de klas vertelt, dan zijn er altijd leerlingen, die aangestoken door dit enthousiasme, actief meedoen, luisteren, vragen stellen, enz. Ook zullen er leerlingen zijn die tegengas geven door lauw te reageren, 'wat slooft die zich uit', enz. Tenslotte zijn er soms leerlingen die het presteren om op het meest dramatische moment van een verhaal, of tijdens het boeiendste deel van het betoog, voor een anticlimax te zorgen: 'mag ik even naar de wc?'

Naast het mee-proces, het tegenproces en het polaire proces kan nog een vierde soort proces optreden, het *duale proces*. Hierbij isoleert zich een proces geheel van de invloed uit de omgeving. Een voorbeeld hiervan is het fenomeen warmtegeleiding, waar telkens warmte ontstaat doordat de stof zich isoleert van de werking van de warmtesfeer (zie paragraaf 4.5 vijfde voorbeeld, blz. 100 e.v.).

De vier warmtefenomenen warmteverbondenheid of -capaciteit, warmtestraling, uitzetting en warmtegeleiding kunnen in samenhang gebracht worden met de vier processen, door beide vierdelingen te beschouwen als een gevolg van de vier ontwikkelingstoestanden van de aarde, zoals Rudolf Steiner die beschrijft. Dit gezichtspunt zal in paragraaf 4.9 nader worden uitgewerkt.

4.7 Opgaven en opdrachten

4.7.1 Opgaven

In een bepaald stadium van de begripsvorming rond een thema als uitzetting is het goed over te gaan tot het maken van opgaven, omdat dit verhelderend werkt. Het werken met getallen maakt het verschijnsel concreter. De formules waarmee men werkt dienen nauw aan te sluiten bij de begripsvorming en geen al te grote abstractie in te houden. Het is van belang de moeilijkheidsgraad van het rekenwerk goed te laten aansluiten bij de mogelijkheden binnen de klas. Ook moet men terdege rekening houden met verschillen in rekenvaardigheid tussen leerlingen. Als thema's waarmee goed gerekend kan worden, kunnen worden genoemd: temperatuur en uitzetting, calorimetrie en de gaswetten. Van dit laatste onderwerp zijn rekenvoorbeelden gegeven in paragraaf 4.5 zesde voorbeeld (zie blz. 106). Hier volgen enige voorbeelden rond het rekenen ten aanzien van uitzetting en calorimetrie. Bij enige opgaven is een uitwerking gegeven, om aan te geven hoe men het gebruik van formules kan hanteren.

Uitzetting:

1. De Brienenoordbrug is 280 meter lang. Het maximale temperatuurverschil tussen zomer en winter is 65°C (van -20°C tot 45°C); α staal = $12/1000$ mm per meter lengte per graad.
Bereken het lengteverschil tussen zomer en winter.
Hoe wordt dit opgevangen (oplegging, vorken)?

Uitwerking:

De uitzettingscoëfficiënt van staal bedraagt $12/1000$ mm per meter lengte en per graad temperatuurverhoging. De Brienenoordbrug, die 280 m lang is, zet dus $280 \times 12/1000$ mm uit per graad temperatuurverhoging. Het temperatuurverschil tussen winter en zomer bedraagt maximaal 65°C , dus de maximale uitzetting is $65 \times 280 \times 12/1000$ mm, ofwel 218,4 mm, dus ruwweg 22 cm.

Als algemene formule vinden we dus: $\text{uitzetting} = \alpha \cdot l \cdot \Delta t$

2. Een houten kozijn van 6 meter staat op een betonnen muur met een stuk lood en in het kozijn zit glas.
Bereken de lengteverschillen tussen zomer (30°C) en winter (-15°C) van glas, hout, lood en beton. Waarom gaat het lood golveren?
3. Een koperen waterleiding van 8 m lengte zet 1,8 cm uit wanneer de temperatuur 75°C stijgt. Bepaal het uitzettingsgetal per meter per graad.
4. Bereken de lengteverandering van een spoorlijn van 5 km
Temperatuur zomer = 25°C , temperatuur winter = -15°C .
5. De Eiffeltoren is 324 meter hoog.
Temperatuur zomer 30°C , temperatuur winter -18°C .
Bereken Δl .
6. Een wiel wordt op een as gekrompen.
As ϕ 30,00 mm, wielgat ϕ 29,85 mm
Tot welke temperatuur moet het wiel verwarmd worden?

Calorimetrie

1. Een blokje koper van 100 m^3 en 150°C wordt in 120 cm^3 water van 20°C gedaan. De eindtemperatuur is 50°C .

Bereken de opwarmsnelheid van koper ten opzichte van water.
 Bereken het warmtegetal van koper ten opzichte van water (warmtegetal water = 1 cal/cm³°C).

Uitwerking:

In paragraaf 4.5, derde voorbeeld, hebben we gezien dat voor de verhouding van opwarmsnelheden van stoffen het volgende geldt:

$$\frac{\text{opwarmsnelheid stof 1}}{\text{opwarmsnelheid stof 2}} = \frac{\Delta T \text{ stof 1} \times \text{volume stof 1}}{\Delta T \text{ stof 2} \times \text{volume stof 2}}$$

$$\frac{\text{opwarmsnelheid koper}}{\text{opwarmsnelheid water}} = \frac{100 \times 100}{30 \times 120} = 2,8$$

Omdat het warmtegetal van een stof de reciproke van de opwarmsnelheid is geldt:

$$\text{warmtegetal koper}_2 = \frac{1}{2,8} = 0,36 \text{ cal/cm}^3\text{°C}$$

2. 100 cm³ water van 80°C wordt bij 100 cm³ spiritus van 20°C gevoegd. De eindtemperatuur is 62°C.
 Bereken de opwarmsnelheid en het warmtegetal van de spiritus.
3. Een blokje metaal van 5x5x4 cm³ wordt (in olie) verwarmd tot 250°C en vervolgens in 150 cm³ water van 20°C gedaan. De eindtemperatuur is 70°C.
 Bereken de opwarmsnelheid van het blokje t.o.v. water.
4. 150 cm³ vloeistof van 95°C wordt in 120 cm³ water van 18°C geschonken. De eindtemperatuur is 45°C.
 Bereken de opwarmsnelheid van de vloeistof t.o.v. water.
 Bereken het warmtegetal.
5. In 1/4 liter water van 25°C worden knikkers gegooid. De eindtemperatuur is 50°C. De knikkers hadden een volume van 400 cm³ en een temperatuur van 80°C.
 Bereken het warmtegetal van de knikkers (1,9).
6. Een blok ijzer van 100 cm³ en 1080°C wordt in 3 dl olie van 20°C langzaam afgekoeld.

Warmtegetal ijzer = $0,86 \text{ cal/cm}^3\text{°C}$.
 Warmtegetal olie = $0,40 \text{ cal/cm}^3\text{°C}$.
 Bereken de temperatuurstijging van olie.

7. 50 cm^3 nog net vloeibaar kaarsvet (52°C) wordt in 100 cm^3 water van 20°C gegoten. De eindtemperatuur is 43°C .
 Warmtegetal kaarsvet $0,6 \text{ cal/cm}^3\text{°C}$.
 Bereken de smeltingswarmte.
8. In een camping gasblikje zit 190 gram butaan in vloeibare toestand bij een druk van $7,5 \text{ atm} \approx 7,5 \text{ bar} \approx 7,5 \text{ kgf/cm}^2$. Bij verdamping ontstaat bij 20°C en normale druk ongeveer 100 liter gas. Wanneer $1/5$ deel (20%) van de warmte die ontstaat bij verbranding gebruikt wordt om water te verwarmen, dan kan 7 liter water van 20°C tot 100°C verwarmd worden. Bereken de verbrandingswarmte van 100 l butaan.

Verbrandingswarmte van gassen bij 0°C en 1 atm :

cal/liter		cal/cm ³		cal/cm ³	
aardgas	7150	benzine	7860	hout	2290
butagas	26200	diesel	8570	steenkool	12000
waterstof	2400	spiritus	4290		

9. Hoe groot is het rendement van een benzinemotor, dieselmotor, stoomketel + turbine, elektromotor + elektriciteitscentrale, boiler, geiser?
10. Wat is de kostprijs van het verwarmen van 150 liter water (1 bad) van 15°C tot 45°C met behulp van een boiler of geiser?

boiler: rendement 90% geiser: rendement 45%
 $1 \text{ Watt} = 0,24 \text{ cal/sec}$ $1 \text{ m}^3 \text{ aardgas}$ kost $f 0,48$
 $1 \text{ KWh} = 860000 \text{ cal}$
 1 KWh kost $f 0,23$.
11. Twee even grote blokjes metaal (ijzer en lood) worden in kokend water verwarmd tot 100°C en vervolgens in bekers met evenveel water van 20°C gedaan.
 In welk bekerglas zal het water het meest in temperatuur stijgen?
 Hoeveel keer is het ene meer gestegen dan het andere? (Zie tabel).

4.7.2 Opdrachten en proefwerken

In deze paragraaf willen we enige voorbeelden geven van huiswerkopdrachten en proefwerkvragen. Belangrijk hierbij is de variatie in de vaardigheden die worden aangesproken.

1. Wanneer de twee- en viertaktmotor in de klas besproken zijn, kan aan de leerlingen de huiswerkopdracht gegeven worden: Zoek zelf uit hoe de dieselmotor werkt en leg dit vast in een verslagje met tekening. Dit is een goede herhaling van het twee- en viertaktprincipe en stimuleert de zelfwerkzaamheid.
2. Idem voor een stoommachine, stoomtrein, dieseltrein, koelkast, airconditioning, verwarmingsinstallatie, enzovoort.
3. Eenvoudige proeven kunnen thuis zelf gedaan worden zoals:
 - de beschrijving van de vlam van een kaars;
 - een koud glas boven een kaarsvlam houden (condens);
 - de dansende waterdruppel in een oude pan;
 - tien situaties zoeken waar isolatie toegepast is.
4. Opdrachten zoals: zoek vijf spreekwoorden over warmte, vuur.
5. Op een proefwerk kunnen niet alleen geheugenvragen en feitenkennis gevraagd worden, maar ook andersoortige vragen. Om verschillende kwaliteiten aan te spreken kan vanuit de planetenkaracters* een indeling gemaakt worden:

<i>Maan</i>	:	reproducerend, spiegelen.
<i>Mercurius</i>	:	praktisch, vlug en gevat, combinerend, nieuwe proefopzet.
<i>Venus</i>	:	persoonlijke visie, meeste indruk, beleving, creatieve weergave.
<i>Mars</i>	:	techniek, toepassing, daad.
<i>Jupiter</i>	:	idealen, ideeën, samenvatten.
<i>Saturnus</i>	:	dieper inzicht, wezen, bezinning.

* Zie o.m. het hoofdstuk planetenprocessen in *Mens op de drempel* van Bernard Lievegoed.

Voorbeeldvragen:

Maan:

- Teken en beschrijf de werking van de verbrandingsmotor, telegraaf, stoommachine, enzovoort.
- Bereken de druk wanneer het volume 2 x kleiner wordt.
- Noem vijf warmteverschijnselen in de atmosfeer.
- Hoe kun je koude laten ontstaan? Drie manieren.

Mercurius:

- Wat hebben de drie proeven met elkaar te maken.
- Bedenk zelf een opgave van calorimetrie en los die op.
- Hoe zou een auto in de toekomst aangedreven moeten worden?
- Zou je water in een papieren bakje aan de kook kunnen krijgen met een gasvlam?

Venus:

- Welke proef of verhaal heeft de grootste indruk op je gemaakt?
- Maak een opstel over de koelkast in relatie tot voeding.
- Geef een vergelijking tussen warmteproces en innerlijke belevingen.
- Elektro-magnetisme en warmte zijn elkaars tegenpolen. Leg dit uit.

Mars:

- Hoe kan de stoommachine van James Watt nog verbeterd worden?
- Hoe kan het rendement van een geiser of cv-installatie verhoogd worden?
- Tot welke technologische ontwikkelingen gaven de proeven van Papin aanleiding?
- Wat zijn de problemen bij het maken van elektrische auto's?
- Welk vervoermiddel wil je later kiezen om dagelijks mee te reizen?

Jupiter:

- Vat de periodestof in zeven regels samen.
- Maak een opstel over het verschil tussen waarnemingen en gedachten.
- Wat zijn de kernideeën van deze periode?
- Bedenk zelf nieuwe voorbeelden van proces en tegenproces.
- Omschrijf de begrippen spanning, stroom en hoeveelheid elektriciteit.
- Lees deze tekst over en noteer de belangrijkste punten.

Saturnus:

- Welke gevolgen heeft het vele autoverkeer voor de mens en de aarde?
- Geef in gedichtvorm het wezenlijke van de warmte weer.
- Welke inzichten hebben we ontwikkeld aan de proef van Franklin?
- Breng de denkbeelden van de oude Grieken in relatie met huidige begrippen over licht, klank en warmte.
- Voer argumenten aan voor het reizen per trein of auto.
- Bedenk een proef waarbij het verschil in isolatie van lucht, wol, piepschuim en isolatieglaswol meetbaar wordt.

4.8 Technologie

4.8.1 Inleiding

Hoewel in dit hoofdstuk de technische toepassing al diverse malen ter sprake kwam, willen we in deze paragraaf alle voor de negende klas belangrijke warmtemachines behandelen. Zoals reeds eerder gesteld, biedt de techniek aan de negende klasser de mogelijkheid om de gevormde begrippen te toetsen aan de concrete werkelijkheid. Het is voor een negende klasser nog moeilijk om in de zekerheid van het denken te geloven, al geeft hij zich ook met elan over aan de discussie. In de techniek hebben ideeën zich bewezen. Dat dwingt respect af. Een negende klasser kan vol bewondering zijn over een knap stukje techniek: "Wat een ei van Columbus!"

Het gaat er in deze periode dus om de leerlingen met de basisprincipes van de techniek te laten kennismaken, en niet om de technische details - dat ligt meer in de lijn van de tiende klas.

De techniek doet in de 18e eeuw zijn intrede in het maatschappelijke leven en breidt zich vanuit Engeland uit over de rest van Europa. De aanleiding hiertoe ligt in het veranderde bewustzijn van de mens vergeleken met de denk- en gevoelswereld van de middeleeuwen. Men staat op een meer afstandelijke wijze tegenover de natuur. Rond 1450 ontwaakt dit 'toeschouwersbewustzijn', dat zich vervolgens geleidelijk manifesteert. Hiermee hangt samen dat in de wetenschap het experiment een steeds belangrijkere rol krijgt. Niet alleen in het bewustzijn, maar ook in het handelen ten aanzien van de natuur krijgt de mens een grotere afstand. Juist dit maakt het mogelijk dat mensen technisch creatief gaan handelen.

De techniek biedt aan de mens de mogelijkheid dingen efficiënter, sneller of krachtiger te doen dan hij zelf kan. Daarom kan men de in de

loop der afgelopen eeuwen ontstane techniek heel goed indelen naar de menselijke functies die de techniek ondersteunt. Op het gebied van het waarnemen kunnen vooral de microscoop, de verrekijker en de spectroscop worden genoemd, terwijl de rekenmachine en later de computer de denkfunctie van de mens ondersteunen. Zowel denken als waarnemen zijn functies van het zenuw-zintuigstelsel en kunnen dus kortweg worden gerangschikt onder de term 'hoofd'. Op het gebied van het handelen en het leveren van kracht zijn de stoommachine, de explosiemotoren, de elektromotor en dynamo, de pomp, de straalmotor(raket), c.v., geiser, trein, tram, e.d. ontstaan. Deze machines ondersteunen dus de ledemaatfuncties van de mens. De communicatieverzorgende machines als de telefoon, telex en fax, de radio en de tv, alsook de film en de foto ondersteunen de sociale functie van de mens en hangen dus samen met het ritmische stelsel of de romp.

Het geheel kan in het volgende schema worden ondergebracht (machines die in de negende klas aan bod kunnen komen staan cursief):

waarnemen	microscoop, verrekijker, spectroscop,	<i>hoofd</i>
denken	rekenmachine, computer	
communicatie	<i>telefoon</i> , telex, fax, radio, tv, film, foto	<i>romp</i>
handelen	<i>stoommachine, explosiemotoren, elektromotor, dynamo, pomp, koelkast, straalmotor (raket), geiser, c.v., trein, tram</i>	<i>ledematen</i>
kracht		

Het *water* speelt in de techniek, evenals in de natuur, een bemiddelende rol. Dit doet zich vooral voor bij de kracht- en warmtemachines. Zoals het leven zich door en in het water kan manifesteren, zo kunnen ook technische ideeën zich realiseren door middel van de bemiddelende rol van het water.

4.8.2 De warmtemachines

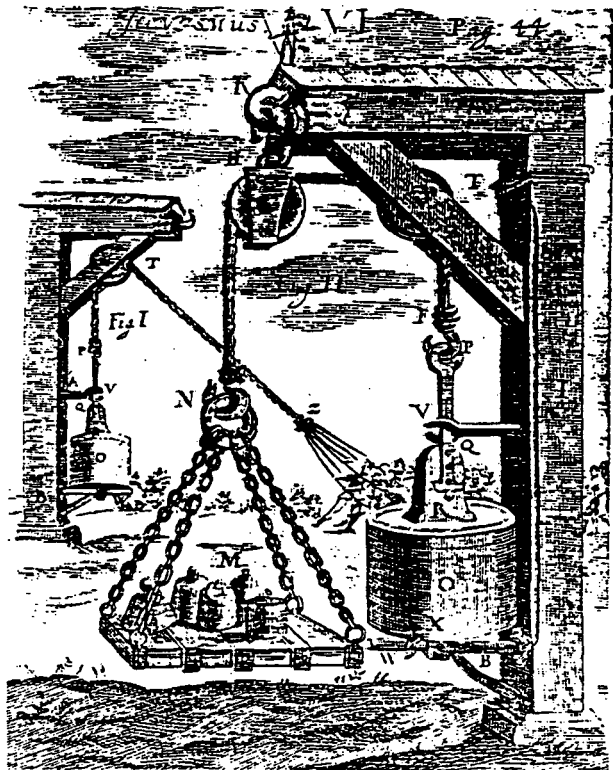
De stoommachine

De ontwikkeling van de stoommachine leidde tot de doorbraak van de techniek binnen de economie. In de geschiedenisperiode van de achtste klas wordt al ruim aandacht aan dit tijdsbeeld besteed. Voor de natuur-

kundeperiode is de ontwikkeling van de machine en de daaraan gepaard gaande rendementsverbetering van belang.

D. Papin (1647-1714) was een van de eerste geniale geesten op dit terrein. Hij ontwikkelde de gedachte dat kracht door stoom geleverd kan worden. Voorts ontwikkelde hij zijn - zeer provisorische - 'pot van Papin', een stoommachine-fontein, onderzeeërs en tal van andere apparaten, die hun tijd ver vooruit waren. Zijn leven ging echter niet over rozen. Hij werd overal weggestuurd, omdat vele proeven in eerste instantie mislukten. (Zie ook Walter Kiaulehn: *Die eiserne Engel*. Verhalend geschiedkundig).

De pot van Papin is een metalen cilinder met water dat verwarmd wordt. Er kon een flinke stoomontwikkeling optreden, waardoor het kookpunt van het water tot 120°C steeg. Hiermee kon volgens Papin het taaiste koeievlees nog gaar gestoomd worden. In 1690 bouwde hij er een zuiger in, waarmee hij een gewicht kon opduwen en na afkoeling iets naar zich toe kon zuigen. Zie figuur 54.

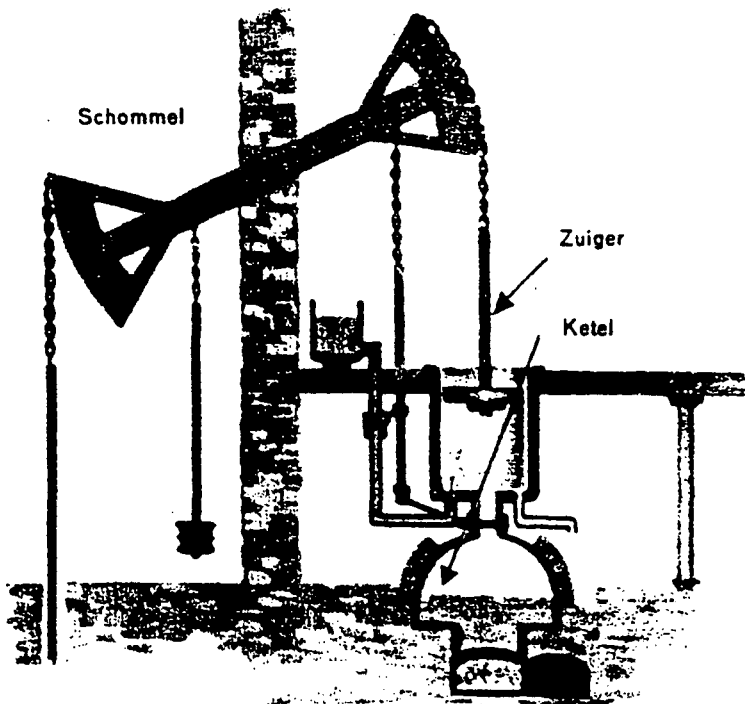


Figuur 54:
De pot van Papin

In latere jaren is de machine door de inzet van velen verbeterd, waarbij de verschillende fasen van het proces ruimtelijk uiteen werden gelegd in stoomketel, stoomcilinder, condensor, enz.

T. Savery (1650-1720) maakte een gescheiden stoomketel en cilinder. Terwijl Papin's machine één slag per minuut leverde en een gewicht van 3 kg op kon tillen, wist Savery dit aantal slagen te verviervoudigen en een rendement van 1,5% te bereiken.

Uiteindelijk maakte T. Newcomen (1633-1729) in 1712 een atmosferische mijn-stoommachine, die decennia lang zijn diensten heeft bewezen. Zijn grootste verbetering was het laten condenseren van de stoom in de cilinder door er een straaltje koud water in te spuiten. De machine maakte 15 slagen per minuut. Zie figuur 55.



Figuur 55: De stoommachine van Newcomen.

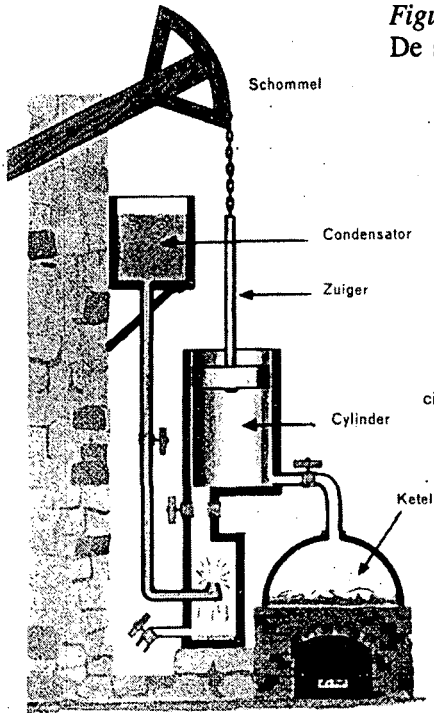
Pas in 1765 werd deze machine nogmaals verbeterd door J. Watt (1738-1819), die de stoom buiten de cilinder liet condenseren in een condensor. Tevens isoleerde hij de stoommachine, omdat hij ontdekte dat stoom een 1800 maal zo groot volume heeft als water en in staat is een 6 maal zo groot gewicht aan water tot het kookpunt te verhitten. Watt deed deze ontdekking nadat hij zich eerst intensief met Newcomen's machine had beziggehouden. Dit leverde vragen op waarmee hij lange tijd rondliep. Op een zondagswandeling passeerde hij een washuis. Plotseling viel hem de oplossing te binnen. Hij liep door en honderd meter verder had hij de technische uitvoering doordacht. De volgende dag zette hij het apparaat provisorisch in elkaar. Het rendement van zijn machine was met een factor 3 toegenomen! Zie figuur 56a.

Dit is een prachtig voorbeeld van de fenomenologische methode, waar de fase van het zich verbinden met het fenomeen gevolgd wordt door de intuïtie, terwijl vervolgens de technische realisering de creatieve, afsluitende fase is. Valt de intuïtie je ineens toe, de technische uitwerking vraagt meestal meer tijd.

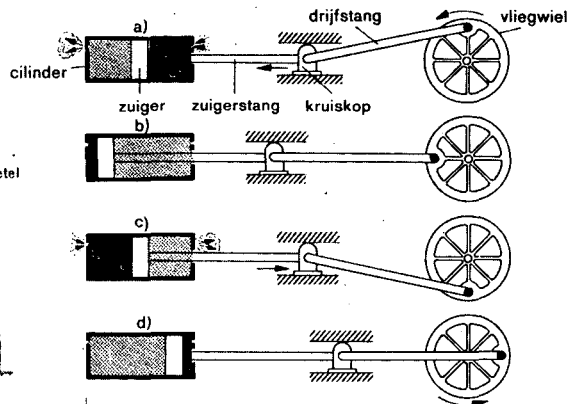
Watt was een geniaal man, die naast zijn wetenschappelijke vermogens ook gouden vingers had. Hij maakte instrumenten, zoals klokken, microscopen, violen, gitaren, orgels, balansen, kompassen, enz. Om de stoommachine een constant toerental te geven ontwikkelde hij het vlieg wiel en de centrifugaal-reguleur. Toen hij ook nog in 1781 de dubbelwerkende stoommachine introduceerde, waarbij hij zeer veel zorg besteedde aan het gieten van de cilinders en het afdichten van de zuiger, was de weg vrij voor toepassing in de industrie (zie figuur 56b).

Door de bereidwillige industrieel M. Boulton kwam er een eind aan zijn inspanningen om alles gefinancierd te krijgen. De stoommachine werd behalve in de mijnbouw ook toegepast in de textielindustrie, de staalindustrie en in het vervoer. De eerste trein werd in 1804 door Trevithik gebouwd. In 1829 haalde de trein van G. Stepheson een snelheid van 32 km/h en won daarmee een wedstrijd. De toepassing op boten (1807) en auto volgde, alleen was de laatste te zwaar voor de toenmalige zandwegen - in de stad kon wel gereden worden. Tegelijk met de stoommachine werd de fiets ontwikkeld, eerst als loopfiets (1791-1839) en pas na 1870 als pedaalfiets. De versnelling maakte de fiets ook geschikt voor gebruik in weer en wind en in de bergen. De drie versnellingsnaaf van Strumey-Archer uit Engeland en de Franse deraillieurs bestaan nu nog steeds (patenten van rond 1905).

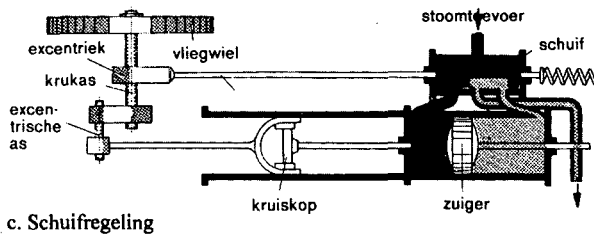
Figuur 56:
De stoommachines van James Watt.



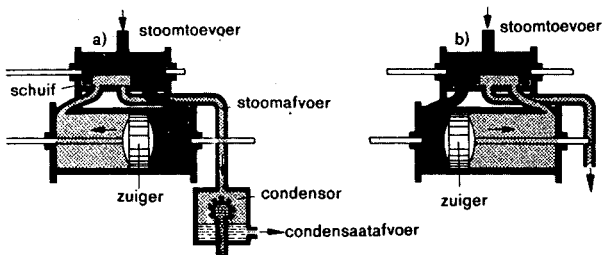
a. De verbeterde machine van Newcomen



b. De stoommachine met stoomschuif en vliegwiel



c. Schuifregeling



d. Stoommachine met platte schijf

De explosiemotoren

Werden bij de stoommachine in de loop van de tijd de verschillende functies als stoomvorming, condensatie e.d. uit elkaar gelegd, in de explosiemotoren worden verschillende functies juist geïntegreerd. Verbranding in de cilinder en restgassen meteen afvoeren leek het ideaal voor een lichte, snelle motor voor voertuigen (zie ook de proevenreeks in paragraaf 4.3.3 zevende voorbeeld, blz. 77 e.v.). Na ruim honderd jaar is het duidelijk geworden dat stoommachines vooral geschikt zijn voor grote, stationaire opstellingen voor verwarming en warmtekracht (stoomturbine van een elektriciteitscentrale), terwijl voor voertuigen explosiemotoren en de elektromotor meer geschikt zijn.

De eerste explosie-gasmotor werd in 1862 door de Belg E. Lenoir ontworpen. Het gas werd gewonnen uit steenkool en werd lichtgas genoemd. Spoedig daarna werd door de zich ontwikkelende olie-industrie benzine op de markt gebracht, die eerst in blikken van 10 liter werd verkocht en later bij de pomp verkrijgbaar was. De motor van Lenoir functioneerde ongeveer zoals een stoommachine met stoomschuif.

In 1876 bouwde N. Otto de eerste 4-takt benzinemotor. In de les kunnen de vier takten (inlaat, compressie, explosie en uitlaat) aan de hand van een model getoond worden. De ontsteking vond plaats met behulp van een Ruhmkorff-inductor. Eén van de grootste problemen was de afdichting van de zuiger en de kleppen. In 1881 ontwikkelde D. Clerk de tweetakt motor, die zonder kleppen werkt en waarbij de in- en uitlaat via poorten verloopt. Het voordeel is minder bewegende delen en per twee slagen een explosie. Een nadeel is de lagere compressieverhouding. Beide motoren hadden het probleem van het vroegtijdig exploderen van het benzine/lucht mengsel (detoneren, kloppen of pingelen.) Vanaf 1923 wordt er lood aan de benzine toegevoegd, waardoor de compressieverhouding verhoogd kon worden.

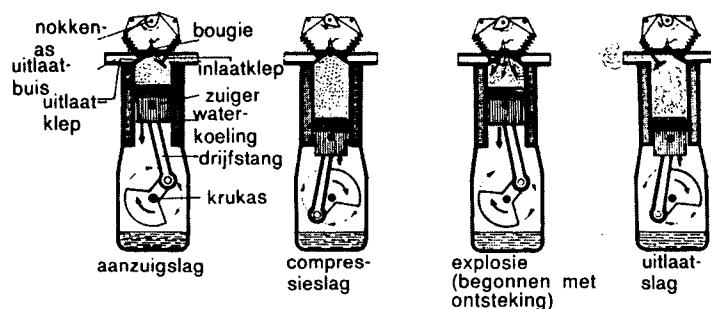
De dieselmotor, die in 1892 door R. Diesel ontwikkeld werd, had deze problemen niet. Deze motor werkt door zelfontbranding, is zuinig in het gebruik en stelt minder hoge eisen aan de brandstof. Dat de dieselmotor langzamer tot ontwikkeling is gekomen heeft naast technische vooral politieke redenen. Diesel verbrandt trager, maar de compressie-verhouding (1:14 à 20 en 800° C) en de explosiedruk (60 bar en 1700° C) zijn veel hoger, waardoor langzaam draaiende motoren veel kracht kunnen leveren. Het rendement is 30 à 35%, dat van benzinemotoren ongeveer 25 à 30%. Zie figuur 57 voor een overzicht explosiemotoren.

Figuur 57: Explosiemotoren

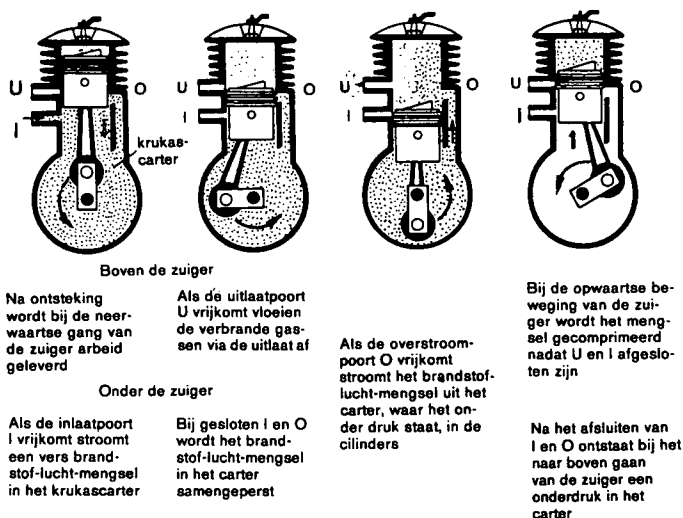
Het proces in iedere verbrandingsmotor verloopt als volgt:

1. De cilinder wordt gevuld met een brandbaar mengsel (mengselmotor), of alleen lucht (dieselmotor).
2. Het brandbare mengsel wordt samengedrukt (gecomprimeerd) en daarna door een elektrische vonk tot ontsteking gebracht (mengselmotor), of alleen de lucht wordt gecomprimeerd, waarna de brandstof wordt ingespoten, gevolgd door zelfontbranding (dieselmotor).
3. Na de explosie laat men de verbrandingsgassen druk uitoefenen op de zuiger.
4. De verbrandingsgassen worden uit de cilinder verwijderd.

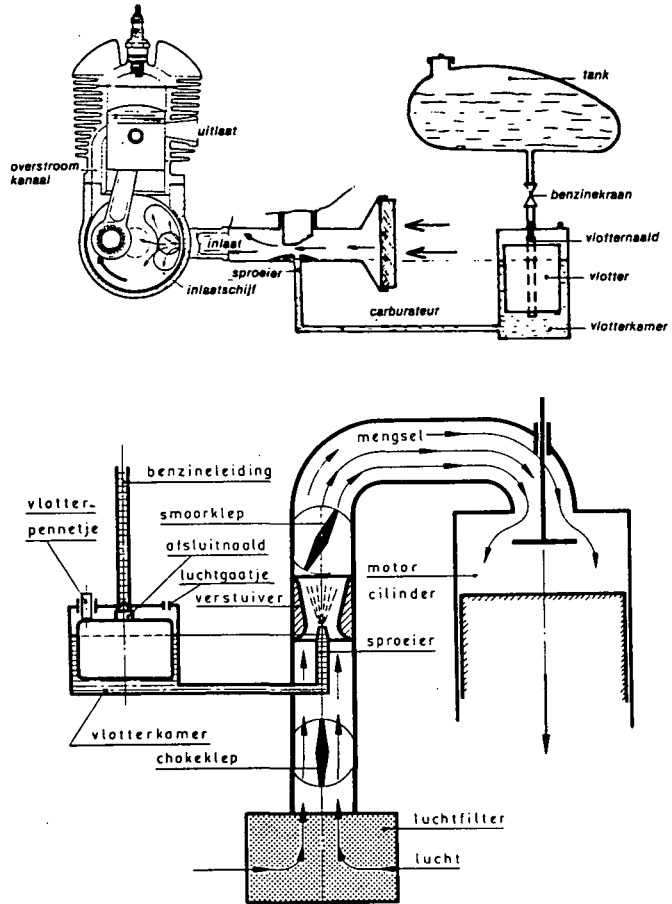
Werking van een viertaktmotor



Tweetakt-benzinemotor met krukastcompressie



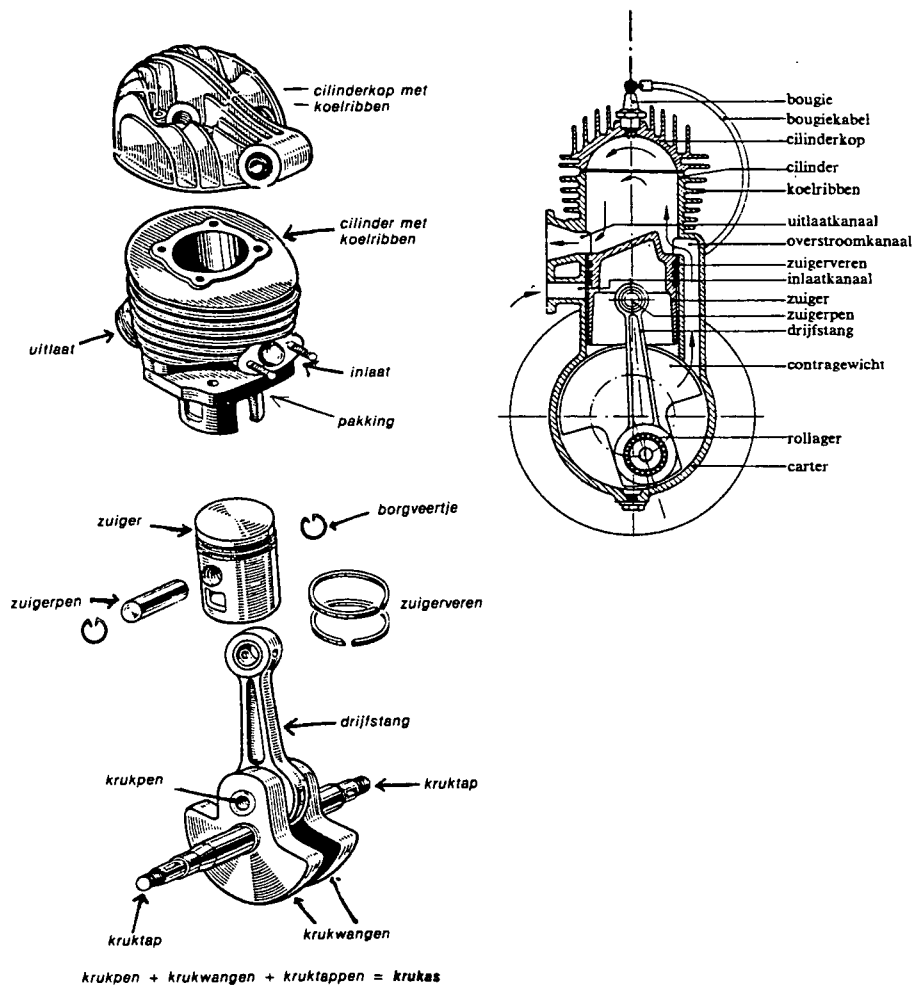
Figuur 58: De carburateur



Toelichting bij de figuur:

De sproeier en vlotterkamer zijn met elkaar verbonden. De benzine in de vlotterkamer staat bij stilstaande motor lager dan de sproeieropening. Wordt de motor gestart en creëert de stromende lucht een onderdruk, dan wordt de benzine uit de sproeier gezogen. De vlotter zakt en de afsluitnaald opent de toevoer van de benzine. De smoorklep of gasklep zit in het inlaatkanaal, waar benzinedamp en lucht gemengd worden. De choke staat vóór de sproeier, zodat bij het starten met dichte choke er een extra onderdruk zal ontstaan, waardoor een verrijkt benzine/lucht mengsel naar de cilinder gevoerd wordt.

Figuur 59: De bromfietsmotor

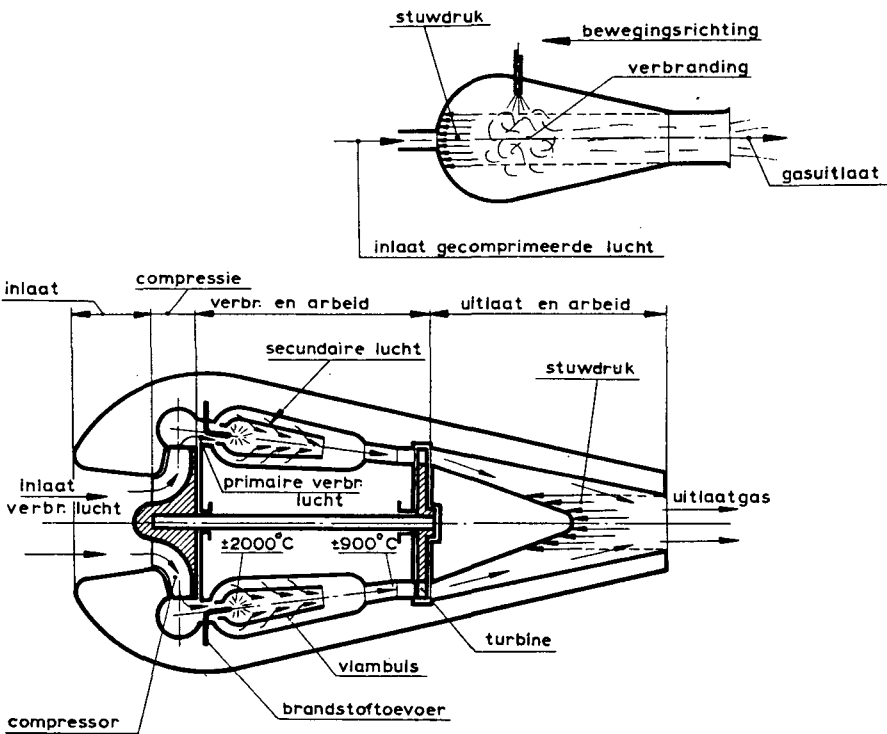


Bij de *meeste* motoren zit tussen de cilinderkop en de cilinder een pakking (koppakking).

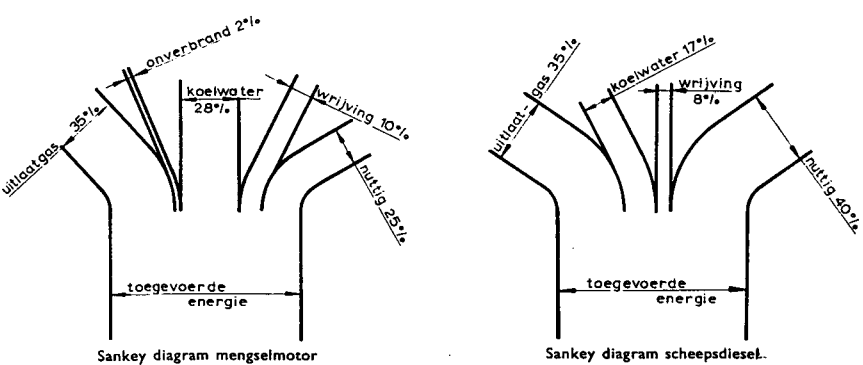
Aan de onderkant van de cilinder zit ook een dunne pakking (voetpakking).

Figuur 60: De straaljagermotor

Bij de straaljagermotor worden - evenals bij de stoommachine - de vier takten ruimtelijk uit elkaar gelegd.



Figuur 61: Rendement explosiemotoren

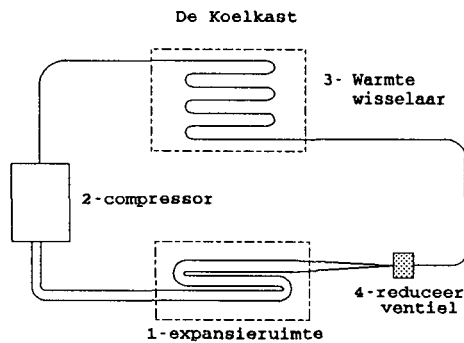


Bij de benzinemotor speelt de verhouding benzine-lucht een belangrijke rol en moet binnen nauwe grenzen afgesteld kunnen worden. In de carburateur wordt de benzine verdampt en vermengd met lucht. Hier kan de venturi besproken worden: lucht stroomt door een plaatselijke vernauwing, waar ook de benzine versproeid wordt. Door de vernauwing krijgt de lucht een hogere snelheid, waardoor de benzine wordt aangezogen en verdampt. (Bekende proefjes als waterstraalpomp, parfumverstuiver, blazen onder een tot U-vorm gebogen papier, het zuigende van een passerende trein en het vliegtuigvleugelprofiel kunnen hier worden aangehaald). Zie figuur 58.

In 1930 werden en de straalmotor en raketmotor ontwikkeld. Een opgeblazen ballon loslaten is een prachtige demonstratie van dit principe. Een raketmotor zet zich af tegen de zelf geproduceerde uitlaatgassen en niet aan de lucht, die eerder belemmerend werkt. Zie figuur 60.

De koelmachine

Aan de compressie-koelkast liggen twee principes ten grondslag: temperatuurstijging door compressie en temperatuurdaling door expansie van een gas. Beide principes zijn eenvoudig door het idee van proces en tegenproces te begrijpen (zie paragraaf 4.6, blz. 121). In het gesloten circuit van een koelkast worden gassen gebruikt die bij lage temperatuur koken, zoals ammoniak, ethylchloride en freon.

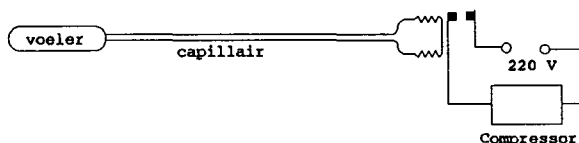


Figuur 62

1. In de verdamper/expansieruimte verdampt de vloeistof onder de invloed van de lage druk. De hiertoe benodigde verdampingwarmte wordt aan de koelruimte onttrokken.

2. De compressor - meestal op de grondplaat bevestigd - zuigt het gas aan en brengt het onder hoge druk en temperatuur naar de warmtewisselaar.
3. In de warmtewisselaar zal het gas onder de invloed van de hoge druk en temperatuurdaling condenseren tot vloeistof. De condensatiewarmte, die hierbij vrij komt, wordt via de geribbelde koelplaat aan de achterzijde van de koelkast aan de omgeving afgestaan.
4. Het reduceerventiel houdt het drukverschil voor en achter dit ventiel in stand.

De temperatuur van de koelruimte wordt geregeld met een thermostaat. Meestal is dit een schakelaar, die wordt bediend door een afgesloten vloeistofkolom. De vloeistof zet uit bij verhitting en krimpt bij afkoeling. Het flexibele uiteinde bedient de schakelaar van de compressor:



Figuur 63

4.9 Ideeënvorming ten behoeve van de docent

4.9.1. Inleiding

In deze paragraaf zullen een aantal ideeën ontwikkeld worden die te omvattend zijn om in de negende klas te behandelen, maar waarvan het zin heeft als de docent zich er ter wille van de eigen vakinhoudelijke ontwikkeling mee bezig houdt. Voor verdere studie wordt verwezen naar de genoemde literatuur.

4.9.2 Warmte in relatie tot de mens

De wereld is een totaliteit. Het is één groot samenspel van werkingen die door de mens te onderscheiden zijn. Met recht mag hier gezegd worden dat het geheel meer is dan de som der delen. De mens, natuur en kosmos is meer dan een optelsom van elementen en energieën. De uit-

spraak van Laplace "Beschouwt men op de meest algemene wijze de kosmos, dan is zij niets meer dan een werktuigkundig probleem" moet als achterhaald beschouwd worden.

Net zoals de mens geen toevallige ingewikkelde chemische fabriek is, zo is de kosmos geen groot werelduurwerk en is de plantenvorm niet uit zijn biochemische structuren af te leiden. De mens is niet te begrijpen zonder zijn innerlijk en bewustzijn en ook de plantenvormen noodzaken tot het denken van de 'oerplant' (Goethe) en van morfogenetische velden (R. Sheldrake).

Wereld en kosmos zijn uitdrukking van machten en krachten die inherent met de uiterlijke verschijning verbonden zijn. De mens beweegt zijn lichaam en een dier leeft vanuit zijn instinct. Steeds is het onzichtbare de drijvende kracht bij organische processen. Dit innerlijk onzichtbare, scheppende, zich manifesterende principe is het 'wezen' dat men wil leren kennen. Ook bij de natuurkracht warmte kan er geen sprake zijn van het alleen eenzijdig uiterlijk beschouwen van warmteverschijnselen, ook hier is het ontstaan of vergaan van warmte een gebaar van het 'warmtewezen' zelf. Geen verschijnsel staat op zichzelf 'geïsoleerd' in de wereld. Steeds is het ingebed in wetten, in intelligentie, in ideeën of, zoals men het vroeger noemde, in God of in de Godin Natura. De warmte van een levend organisme mag niet beschouwd worden als een bijproduct van de stofwisseling. De warmte is juist de ruimtelijke manifestatie van het aller-essentiële, van het meest specifieke.

Rudolf Steiner onderscheidde als geesteswetenschapper bij de mens vier elkaar doordringende principes: het fysieke, het levende, het beleven- de en het individualiserende principe, veelal aangeduid met de woorden fysiek lichaam, ether-lichaam, astraal lichaam, ik-organisatie. Deze vier systemen of lichamen hebben ieder hun specifieke wetmatigheden (zie ook hoofdstuk 1).

Het fysieke lichaam is met de uiterlijke zintuigen waarneembaar, de andere alleen met innerlijke zintuigen, die ieder mens in principe kan ontwikkelen. In het fysieke lichaam is de werking van de andere lichamen zichtbaar. Een onderscheiding is mogelijk volgens de vier elementen:

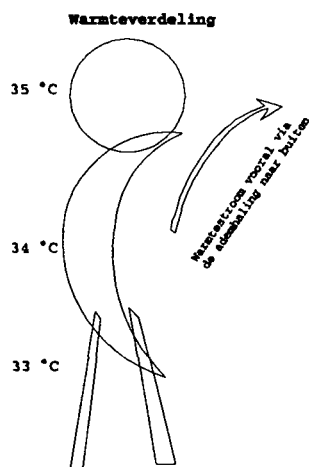
ik-organisatie	-	vuur
astraal lichaam	-	lucht
ether-lichaam	-	water
fysiek lichaam	-	aarde

Het 'ik' en de warmteprocessen zijn bij de mens zeer nauw met elkaar verbonden. Het menselijk lichaam zou een machine zijn wanneer er geen warmte was. In en door de warmte leeft het geestwezen (ik) van de mens.

Het warmte-organisme ontwikkelt zich van de plant via het dier naar de mens toe tot steeds grotere zelfstandigheid. Bij de plant is de warmte als voorwaarde in de omgeving aanwezig. Eigen warmte ontwikkelt de plant vooral in de bloesem en de vruchtvorming is als een innerlijk warmteproces te begrijpen. Bij de dieren treedt de karakteristieke indeling in koud- en warmbloedig op de voorgrond. Daarnaast zijn er de dieren die een winterslaap houden. 's Winters gedragen ze zich als koudbloedige en 's zomers als warmbloedige dieren. Bij de mens is het warmte-organisme het meest gespecificeerd. De warmteregulatie vindt in hoge mate plaats via de huidcapillairen, vervolgens via ademhaling en transpiratie en in laatste instantie, bij grote temperatuurverschillen, via een verandering van de stofwisseling. De warmteregulatie is een anticiperend systeem. Een mogelijke tendens is reeds aanleiding tot regulatie.

Zoals de ademhaling en bloedsomloop als relatief zelfstandige systemen te onderscheiden zijn, zo is ook het warmte-organisme als relatief zelfstandig te typeren. Het 'ik' van de mens drukt zich uit in de dagelijkse bewustzijnsveranderingen die gepaard gaan met warmteprocessen. Zo is 's nachts om drie à vijf uur de warmteproductie het laagst en 's middags om vijf à zes uur het hoogst. Dit loopt synchroon met het natuurritme. Het is 's ochtends het koudst en 's middags het warmst. De warmteregulatie is tijdens de slaap veel minder gedifferentieerd dan tijdens het waken. Reeds meer dan een uur voor het ontwaken begint het lichaam al warmer te worden. Dit zijn voorbeelden die laten zien dat het bewustzijn, het 'ik', direct in het warmte-organisme leeft. Antroposofisch gezegd: het ik is in het warmte-organisme geïncarneerd. Ook tijdens de slaap houdt het 'ik' het lichaam in de gaten en grijpt in wanneer het lichaam te veel afkoelt of te warm wordt.

Warmte ontstaat in de stofwisseling onder andere in de spieren. Het warmte-orgaan bij uitstek is de lever. Het warmte-organisme van de mens is zeer gedifferentieerd. Tegenwoordig zijn met behulp van infrarood-camera's thermogrammen gemaakt waardoor gezonde en specifieke ziekelijke warmteverdelingen kenbaar zijn. De diagnose is echter nogal omslachtig en wordt dan ook weinig toegepast.



Figuur 64

Het hart is een heel belangrijk 'zintuig' om de toestand van het lichaam

waar te nemen. De bloedtemperatuur is één waarnemingsmogelijkheid. Het bloed vanuit het hoofd is circa 1,5°C lager dan het bloed vanuit het onderlichaam. Dit komt in het hart bij elkaar en mengt zich weer. In de longen - het koudste orgaan - koelt het bloed weer af. Het handhaven van warmteverschillen en van de gemiddelde temperatuur van 37°C kan gezien worden als een subtiel proces dat direct samenhangt met het bewuste ik van de mens.*

De samenhang tussen gevoelens, het hart en de warmte is direct beleefbaar. Gevoelens, gedachten maar ook het willen handelen drukken zich uit in warmteprocessen. De plaats van het lichaam waar de warmte-uitstraling het grootst is hangt direct samen met de psychologische dominante activiteit. Bij intellectuele arbeid is dit om het hoofd, bij emotionele belevingen rond de borstkas en bij wilsmatige bewustzijnsinhouden is dit het hele lichaam met een accent op het onderlichaam.

Ook hier dus de samenhang tussen bewustzijn en warmte. Zoals in de natuur de warmte staat voor beweging, openheid en omvorming, zo ook in de mens. Waar warmte is, is ook leven en bewustzijn. En zoals het innerlijk en uiterlijk inherent samengaan, zo ook warmte en bewustzijn. De warmte is uiterlijk ruimtelijk, het bewustzijn is innerlijk onruimtelijk. Toch moeten we het hoofd koel houden om tot heldere gedachten te komen.

Spieren en stofwisseling staan tegenover zenuwen en hersenen, de lichamelijke basis voor handelen respectievelijk denken. In de warmte als geheel treden weer differentiaties op. Voor het heldere wakkere bewustzijn is de warmte-*uitstraling* van essentieel belang, voor het handelen is het *ontstaan* van warmte in de spieren doorslaggevend.

4.9.3 Rudolf Steiners 2e natuurwetenschappelijke cursus

Veel van wat in dit boek is beschreven kon ontwikkeld worden door gebruik te maken van gezichtspunten die Rudolf Steiner in de zogenoemde 2e wetenschappelijke cursus uitwerkte ten aanzien van de warmte. Daarom wordt hier een kort overzicht gegeven van enige voor dit hoofdstuk relevante thema's die in deze cursus behandeld worden. Het is geenszins een uitputtend overzicht, slechts enkele thema's worden aangeduid, zodat de lezer een zeker beeld krijgt van de inhoud van de cursus.

* F. Husemann: *Das Bild des Menschen als Grundlage der Heilkunst*.

De cursus werd gehouden in Stuttgart, voor de leerkrachten van de eerste Vrije School aldaar en bestaat uit 14 voordrachten.*

Rudolf Steiner plaatst de warmte in een overgangspositie tussen imponderabele (niet stoffelijke) krachten en ponderabele (stoffelijke) krachten. Tot de imponderabele krachten behoren de levenswerkingen, de chemische en klankeffecten en het licht. Het geheel van deze werkingen noemt hij de bovennatuur. Deze krachten zijn centrifugaal, werken van binnen naar buiten. Tot de ponderabele krachtvelden behoort het gasvormige, het vloeibare en het vaste, door Steiner opgevat als krachten, een gezichtspunt dat goed vergeleken kan worden met de elementen van Aristoteles. Deze krachten zijn centrumgericht. Als derde onderscheidt Steiner het gebied van de ondernatuur. Dit bevat onder meer de elektrische en magnetische krachten en de polarisatie. In schema:

levenswerkingen	) imponderabel krachtenveld,
chemische of klankeffecten	) centrifugaal gericht
lichtgebied	)

warmte

gasvormige gebied	) ponderabele krachten,
vloeibare gebied	) naar het centrum gericht
vaste gebied	)

gebied van de ondernatuur

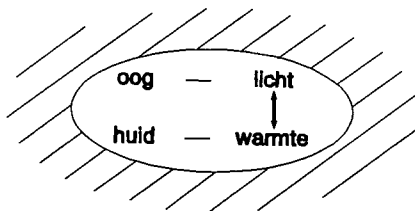
De warmte moet nu gedacht worden tussen de imponderabele, centrifugaal gerichte krachten en de ponderabele, naar het centrum gerichte krachten. Steiner beschrijft het warmtewezen als zich openbarend op het grensvlak van het ruimtelijke en het onruimtelijke. Het warmtewezen wordt nooit helemaal afgesnoerde ruimtelijkheid, zoals lucht of water, maar blijft in het dynamische proces van 'zijn' en 'zich opheffen'. Zinnebeeldig beschrijft Steiner de warmte als een wervelwerking, een fysiek/geestelijke dynamiek, waarbij het stoffelijke - datgene dat door de zintuigen waarneembaar is - door niet-stoffelijke, geestelijke werkingen vernietigd wordt, terwijl omgekeerd vervolgens deze geestelijke werking weer *verdrongen* wordt door het stoffelijke.

* Rudolf Steiner: *Zweiter naturwissenschaftlicher Kurs*.

De overgang van ruimtelijk naar onruimtelijk en omgekeerd kan overal plaatsvinden. Met Aristoteles kan gezegd worden: het is het proces van potentia naar actu en terug. Vanuit de projectieve meetkunde kan het ruimtelijke met het eindige en het onruimtelijke met het oneindige in verband gebracht worden. Dit zal in paragraaf 4.9.5 nader worden uitgewerkt.

Hoe kan dit onruimtelijke gedacht worden? Steiner duidt het aan als het innerlijke van de ruimte, als het intensieve dat de ruimte doortrekt. Scheur de ruimte open en warmte stroomt de ruimte in. Hij gebruikt hier de begrippen ruimtevulling en zuigruimte. De werking van het stoffelijke is ruimtevullend, terwijl de warmtewerking als zuigruimte voorgesteld kan worden. Dit kan in verband gebracht worden met twee begrippen uit de projectieve meetkunde: het puntgebied en het omhullende lijnenveld. Zoals in paragraaf 4.9.5 zal worden uitgewerkt zijn puntgebied en lijnenveld op te vatten als mathematische uitdrukkingen van ruimtevulling en zuigruimte. Aarde en zon zijn extreme verschijningen van deze twee werkingen. Een brandend stuk hout heeft ruimtevulling, maar is tegelijkertijd zuigruimte voor potentiële warmte die actueel de ruimte instroomt.

Naast het spectrum van natuurkrachten komen in de cursus nog vele andere aspecten aan bod. In de hoofdstukken 2 en 3 wordt een beeld geschetst van de verhouding tussen het menselijke bewustzijn en de natuur. Het menselijke bewustzijn stuit naar twee kanten op een grens: naar buiten toe door de zintuigen en naar binnen door de eigen beleving. De mens staat door middel van de zintuigen op een bewuste wijze in verhouding tot de natuur en medemens. Twee zintuigen markeren het zintuigveld op een bepaalde wijze: het oog en de huid. Het oog is het meest geïsoleerde zintuig dat embryonaal uit de huid en uit een zenuw ontstaat.



Figuur 65

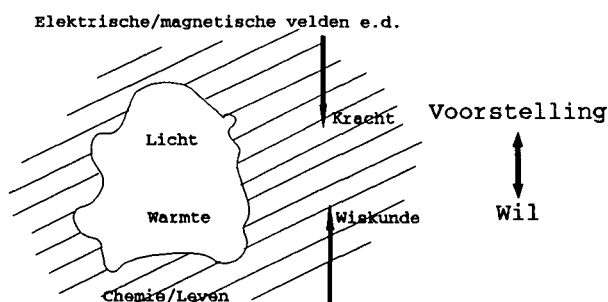
Het oog wordt het meest van alle zintuigen vergeleken met een apparaat: de camera. Het bolle oog boven in het hoofd, omgeven door stevige beenderen, is een soort venstertje, waardoor de mens vanuit zijn

burcht de wereld in kijkt. De huid, maar ook de mondholte en slokdarm, is een zeer sensibel orgaan voor warmte/koude en voor druk/streling. Met de huid staat de mens met zijn hele lichaam waarnemend en gewaarwordend in de wereld.

Zo afstandelijk de mens zich verhoudt tot het licht, zo direct en indringend is hij verbonden met de warmtegebaarwordingen. De intensiteit en kleur van het licht kan waargenomen worden in een grote schakering. De warmte is veel meer een eenheidsbeleven binnen relatief nauwe grenzen. Met weinig 'kleur' beleeft de mens de warmte. De mens leeft *in* de warmte, waarbij de bewuste waarneming steeds weer oplost. Ten aanzien van het licht is er een voortdurend proces van waarnemen, waarbij de mens zichzelf als onafhankelijk hiervan beleeft.

- Warmte kan nog tot object worden, maar lost dan weer op, omdat men er helemaal in op gaat.
- Het licht staat verder buiten de mens, maar licht en kleurverschijnselen kunnen in al hun verscheidenheid nog net tot waarnemingsobject worden.

Er zijn gebieden waar de mens nog diepgaander in verankerd is en er zijn ook gebieden die nog verder van de mens af staan. Deze laatste natuurkrachten zoals elektriciteit, magnetisme en dergelijke werken wel op de mens in, maar hij kan ze niet waarnemen. De eerste treden niet in het bewustzijn, omdat de mens te zeer verbonden en één is met deze krachten. Het zijn de chemische werkingen en de levensprocessen, waardoor de mens gedragen wordt. Steiner zegt dat wiskunde samenhangt met deze levensprocessen. Wiskunde bedrijven is werken met tot *beeld* - geworden levensprocessen.



Figuur 66

Aan de ene kant - ten aanzien van de elektrische en magnetische krachten - lost de waarnemingsmogelijkheid op, aan de andere kant is er

een samensmelten met de wilsnatuur van het leven zelf. Een versterking en uitbreiding van het bewustzijn is nodig om denkend-imaginatief deze gebieden te doordringen. De mens moet niet alleen een beeld van de wereld in zijn bewustzijn krijgen, maar hij moet zich ook via zijn denkend bewustzijn met de wereld verbinden.

4.9.4 De afdruk van de vier aardfasen in warmteverschijnselen en warmteprocessen

In het werk van Rudolf Steiner wordt op meerdere plaatsen beschreven dat de aarde - en daarmee in verband staande ook de mensheid - eerdere ontwikkelingsstadia heeft gekend voor deze zogenaamde aardfase.* Vooraf gingen de saturnus-, respectievelijk zon- en maanfase. Zowel van de aarde als van de mensheid wordt een beeld geschetst van een ontstaansproces, waarin goddelijk-geestelijke wezens werkten - en nog werken - aan een zich ontwikkelende schepping, die zich gefaseerd voltrok. In *Die Evolution vom Gesichtspunkte des Wahrhaftigen* beschrijft Steiner deze fasen en stelt hij dat de eerdere ontwikkelingsstadia hun afdruk vinden in de huidige aardfase. Steeds stelt hij de geestelijke werkzaamheid van goddelijke wezens primair en beschrijft hij hoe natuurkundige fenomenen als warmte en licht ontstonden als stoffelijke afdruk van deze werkzaamheid.

Voor de lezer die niet met zijn werk bekend is zij hier opgemerkt, dat Steiner dergelijke beschrijvingen geeft op grond van wat hij zelf noemt 'helderziende waarneming'. In de geestelijke wereld zijn van gebeurtenissen die in het verleden plaatsvonden afdrukken bewaard gebleven, die het een mens met voldoende helderziende vermogens mogelijk maakt dergelijke gebeurtenissen te schouwen. In het navolgende zal per aardfase een kort resumé van de beschrijving van Steiner worden gegeven. Noodzakelijkerwijs kunnen zijn ideeën op dit gebied binnen het kader van deze paragraaf slechts beperkt worden weergegeven; vooral op de stoffelijke schepping zal worden ingegaan. Aansluitend zal dan worden onderzocht hoe de verschillende aardfasen hun neerslag vinden in de warmtefenomenen en processen, zoals zij eerder in dit hoofdstuk beschreven staan. Voor een ieder die zich diepgaander met deze materie wil bezighouden lijkt ons de studie van het werk van Steiner op dit gebied noodzakelijk.

* Rudolf Steiner: *Geheimwissenschaft im Umriss*.

In de saturnusfase van de aardeontwikkeling ontstonden van alle verschijnselen, die nu op aarde te vinden zijn, alleen de fenomenen warmte en tijd. Met de schepping werd in de saturnusfase een eerste begin gemaakt, zij ontwikkelde zich vanaf dit punt. Met deze ontwikkeling ontstond inherent ook de tijd, omdat ontwikkeling altijd samenhangt met tijd.

De eerste scheppingsdaad die tot een meer substantieel resultaat leidde deed de warmte ontstaan. In de saturnusfase was de aarde een wereld, die in stoffelijk opzicht slechts uit warmte bestond - voor zover men tenminste warmte stoffelijk kan noemen. Om zich warmte voor te stellen zonder andere stoffelijkheid vergt veel van ons voorstellingsvermogen. Steiner beschrijft dat aan het ontstaan van warmte in de saturnusfase een geestelijk proces ten grondslag lag. Zeer hoge goddelijk-geestelijke wezens stelden hun wilskracht, hun scheppende wilssubstantie ter beschikking ten behoeve van de schepping. Dit ter beschikking stellen noemt Steiner een offeren. Men kan dit gebeuren vergelijken met een mens die het beste van zichzelf ter beschikking stelt aan zijn omgeving, zonder daarbij op eigen voordeel bedacht te zijn. Daar kunnen wij innerlijk warm voor lopen. Uiterlijk waarneembaar wordt dit slechts in de uitingen van ons enthousiasme. Het geestelijke scheppingsproces van de warmte in de saturnusfase vroeg om een offerkracht, dat moeten we ons realiseren, van een boven de mensen-maat uitgaande intentie en intentionaliteit, zodat niet alleen innerlijke, maar ook uiterlijke warmte kon ontstaan. Ook op de huidige aarde, zo stelt Steiner, gaat achter elk ontstaan van warmte de offerkracht schuil van geestelijke wezens. De mens neemt slechts de uiterlijke neerslag waar; wat daar achter ligt blijft voor hem verborgen.

Een ruimtelijke ordening was er tijdens de saturnus-fase nog niet. Polariteiten als onder-boven, binnen-buiten hebben op de wereld van saturnus geen toepassing. Men kan zich saturnus het beste voorstellen als een alzijdig symmetrische warmtekosmos, waarbinnen slechts modificaties in de mate van warmte en koude bestonden.

Nu stelt Steiner dat de eerdere aardfasen, zoals de hierboven beschreven saturnus-fase, op allerlei niveaus terug te vinden zijn, zowel in geestelijk als in stoffelijk opzicht. Gaan we in de huidige aardfase op zoek naar verschijnselen, die deze saturnusfase weergeven, dan stuiten we bijvoorbeeld op de verbrandingsprocessen: in elk verbrandingsproces 'offert' zich substantie - geeft zijn actuele vorm op - én ontstaat nieuwe warmte. Zo'n proces noemen we een mee-proces: zo'n stof wil graag branden, zolang de voorwaarden daartoe vervuld zijn. Binnen de warmte-verschijnselen zelf geeft de warmtecapaciteit of warmteverbondenheid het duidelijkst de saturnusfase weer (zie 4.5 derde voorbeeld, zie blz. 93). Deze fase wordt namelijk gekenmerkt door een nog geheel naar binnen

gerichte werkzaamheid, er wordt nog niets echt uiterlijk, in plaats van extensief blijft de werkzaamheid intensief. De mate waarin een stof met de warmte verbonden is, komt alleen tot uitdrukking in een tijdproces, namelijk in de snelheid waarmee deze stof verwarmd kan worden. Alleen de factoren warmte en tijd spelen een rol, zolang we alleen naar de warmteverbondenheid kijken en andere fenomenen die met warmte samenhangen er nog niet in betrekken.

Tijdens de tweede fase van de aardeontwikkeling, de zonnefase, ontstond enerzijds het lucht-element en anderzijds het licht. Vergeleken met de warmte is het luchtelement een dichtere substantie. Voor het eerst komt tastbare substantie tot stand. Steiner beschrijft dat ook dit scheppingsproces het gevolg was van de werkzaamheid van goddelijk-geestelijke wezens, die hun wijsheid, hun denkkraft, lieten uitstromen. Men krijgt een juiste voorstelling van deze werkzaamheid, door deze denkkraft of wijsheid te vergelijken met een mens die door een nieuw idee tot creatieve werkzaamheid komt, waardoor iets wezenlijk nieuws wordt toegevoegd aan de werkelijkheid. Weer moet men zich een dergelijke activiteit op een enorme schaal voorstellen en van bovenmenselijke scheppingsmacht vervuld, om er zich een beeld van te kunnen vormen hoe het schenken van wijsheid kon leiden tot het ontstaan van het luchtelement. Daarbij moet men zich dit schenken van wijsheid ruimtelijk gezien van binnen naar buiten toe uitstromend voorstellen.

Steiner beschrijft dat in deze fase van het proces nog andere geestelijke wezens aan de schepping gaan deelnemen, die deze naar buiten toe uitstralende wijsheid in zich opnemen en pas op een later tijdstip naar binnen toe terugstralen. Dit leidde tot het ontstaan van het licht. De werkzaamheid van deze geestelijke wezens kan men vergelijken met het denken van de mens. Denken noemt men ook bespiegelen of reflecteren. Denken wij na over onze ervaringen, dan stralen wij de werkzaamheid van deze ervaringen zodanig terug, dat zij in een samenhang komen te staan: wij laten ons 'licht er op schijnen'. Enerzijds hebben wij onze ervaringen, die we als tot tastbaar resultaat geworden wijsheid kunnen beschouwen. Anderzijds spiegelen we met ons denken deze wijsheid zodanig terug, dat zij in een licht komt te staan. Op deze manier kunnen we ons er een voorstelling van vormen wat Steiner bedoelt met zijn uitspraak dat ook op de huidige aarde achter elk uiterlijk licht teruggestraalde wijsheid schuil gaat.

Door de van binnenuit uitstromende wijsheid en de van buitenaf terugstralende activiteit ontstond tijdens de zonnefase de polariteit van binnen en buiten. Daarmee ontstond de eerste ruimtelijke ordening.

Andere ruimtelijke tegenstellingen als onder-boven voegden zich hier later aan toe.

We stellen ons nu opnieuw de vraag welke fenomenen een afdruk zijn van deze zonnefase. Binnen de warmtefenomenen komen we zo bij de warmtestraling (zie 4.5 vierde voorbeeld, zie blz. 97). Bij warmtestraling is er een bron die straalt (geeft) en een omgeving die opneemt en later terugstraalt. Bij de warmteverbondenheid laat de stof alleen zien in hoeverre deze met het warmtewezen, de warmtesfeer, verbonden is. Bij warmtestraling ontstaat nu ook een veld, en daarmee een polariteit binnen-buiten. Een verschijnsel dat de zonnefase tevens vertegenwoordigt is het gegeven, dat waar processen zich afwickelen, ook tegenprocessen werkzaam zijn, waardoor zich een evenwicht ontwikkelt tussen actie en tegenwerking. Zoals samengeperst gas, dat heet wordt, om de volumewerking tegen te gaan (zie 4.6 tweede voorbeeld, zie blz. 121). Ook in dergelijke fenomenen wordt een sterke spanning tussen binnen en buiten zichtbaar.

Tijdens de derde fase van de aardeontwikkeling, de maanfase, trad een nieuw element op de voorgrond. Terwijl het offeren van wilssubstantie, dat vanaf de saturnusfase tot het ontstaan van warmte leidde, ook tijdens de zonnefase voortduurde, treedt hierin tijdens de maanfase een differentiatie op. Een groep van goddelijk-geestelijke wezens wijst een deel van deze offerende werkzaamheid af. Hierdoor onttrok deze groep van wezens zich aan de ontwikkeling in de tijd. Als gevolg hiervan krijgt vanaf dit moment naast het tijdelijke ook het eeuwige of het duurzame zijn neerslag in de schepping.

Er voltrok zich nu een scheiding tussen de wezens wier offerkracht werd aanvaard en die daardoor vol in het scheppingsproces waren betrokken en die wezens die hier van waren buitengesloten, doordat hun offerkracht werd afgewezen. Overigens moet men zich niet voorstellen dat het hierbij om een beoordeling op morele gronden ging, maar veeleer om het gegeven dat de genoemde differentiatie noodzakelijk was om een verdere ontwikkeling mogelijk te maken. Ontwikkeling sluit differentiatie altijd in, omdat hieruit nieuwe tegenstellingen ontstaan die het geheel verrijken. In dit geval leidde de scheiding tussen wezens die bij het ontwikkelingsproces zijn betrokken en diegenen die er van zijn uitgesloten tot het ontstaan van de tegenstelling tussen beweging en verstarring op stoffelijk niveau. Hiermee in verband staande ontstond nu ook het water-element, de vloeistof. Vloeistof verenigt namelijk zowel het beweeglijke als het starre in zich. Het is vorm-beweeglijk, maar volume-star. Daarbij wordt het vloeiende zowel gekenmerkt door ordening als door beweeglijkheid.

Dat het terugwijzen van impulsen vruchtbaar kan zijn en de weg vrij maakt voor het ontstaan van iets nieuws kennen we ook uit innerlijke ervaring. Op fysiek niveau leidt het inzetten van wilskracht tot goed resultaat. Maar geestelijk nemen onze scheppende vermogens toe als wij niet al onze wilsimpulsen direct volgen. Een kunstenaar kan niet tot iets nieuws komen door louter krachtsinspanning. Hij moet ook kunnen afwachten. Een soort terughoudende activiteit moet ontplooid worden, die de inspiratie als het ware uitspaart en daardoor afdwingt. Een dergelijke geestelijke activiteit noemt Steiner resignatie. Ook op de huidige aarde gaat achter elke vloeistof de resignatie schuil van geestelijke wezens ten opzichte van de offerkracht van anderen.

Binnen de huidige aardfase geven de polaire processen het duidelijkst deze maanfase weer. Bij polaire of tegengestelde processen ontstaan uit dezelfde activiteit tegengestelde fenomenen. Bijvoorbeeld door het wrijven van stoffen ontstaan warmte en elektriciteit. Daarbij geeft de warmte het verbonden zijn met de wereld en met het beweeglijke weer, terwijl de elektriciteit de kant van het afgesnoerd zijn van de wereld en van de verstarring vertegenwoordigt (zie hoofdstuk 5). Door de verdergaande verdichting van de stoffelijkheid gedurende de maanfase ontstond de overgang van intensieve dynamiek (saturnus) naar extensief, zich uiterlijk openbaren van de stoffelijkheid. Het warmtefenomeen uitzetting geeft duidelijk dit aspect van de maanfase weer. In de uitzetting krijgt de warmte een uiterlijk karakter. Terwijl bij de straling het ruimtelijke veld ontstond, krijgt de warmte in de verschijnselen van uitzetting en inkrimping en de daarbij behorende overgang van de vaste stof naar de vloeistof naar gas en omgekeerd, uiterlijk gestalte, zij wordt fenomeen. Ook de polariteit beweging-verstarring vinden we hier terug.

We vervolgen de beschrijving van Rudolf Steiner. De resignatie van een groep van goddelijk-geestelijke wezens ten opzichte van de offerkracht van andere wezens zet zich tijdens de aardfase voort. Dit leidt er toe dat die wezens, wier offersubstantie niet wordt aanvaard, zich vervreemd gaan voelen van hun eigen offerkracht. Deze offersubstantie wordt daardoor uitgesloten uit het verdere wereldgebeuren. Dit gebeuren laat zich vergelijken met die situaties, waarin een mens niet door anderen wordt aanvaard, waarin zijn eigenheid wordt afgewezen. Zo iemand gaat zich vervreemd voelen van zichzelf en van de ander, hij kan zich moeilijk identificeren met zijn persoonlijke eigenschappen en vermogens. Hierdoor kan hij zich niet verbinden met de mensen in zijn omgeving, hij komt op zichzelf te staan.

Tabel 5: Aardfasen en daarmee samenhangende verschijnselen.

aardfasen	geestelijke activiteit	stoffelijke neerslag	afdruk van de vier fasen op aarde		
			warmtefenomeen	proces	wezen en verschijning
saturnus	offer	warmte en tijd	warmteverbondenheid	mee-proces	warmtesfeer
zon	schenken terugstralen	lucht ruimte licht	warmtestraling	proces en tegen-proces	veld
maan	resignatie scheiding opgenomen/ afgesloten	water extensief karakter verdichting	uitzetting/ inkrimping faseovergangen	polair proces	fenomeen
aarde	isolement	dood vaste stof	warmtegeleiding	duaal proces	

Op stoffelijk niveau leidde het uitsluiten van de offersubstantie ertoe dat de dood zijn intrede deed in de schepping. Ook in de dood wordt substantie - het lijk - uitgesloten van het verdere leven. Tevens ontstond het vaste stof element, waarin de substantie het meest geïsoleerd op zichzelf staat, wat zich uit in de starheid en de onmengbaarheid van vaste stoffen.

Binnen de natuurkundige fenomenen vindt men dit terug in elkaar uitsluitende processen. We spreken van duale processen. Hierbij toont een fenomeen zich onafhankelijk van invloeden van buitenaf, zoals bijvoorbeeld de radioactiviteit, die onafhankelijk is van natuurkundige of chemische veranderingen van de stof. Binnen de warmtefenomenen geeft de warmtegeleiding de aardfase weer. Zoals in 4.5 vijfde voorbeeld (blz. 100) wordt uiteengezet kan warmtegeleiding gezien worden als een dynamisch zich uitbreidend vergaan en ontstaan van warmte. De uiterlijke warmte die steeds ontstaat komt tot stand doordat de stof zich van de warmtesfeer isoleert. Dit doet de stof omdat hij niet mee wil gaan met de uitzetting van het warme gebied. Dit is nu als volgt te begrijpen: waar de stof zich met de warmtesfeer verbindt, toont hij het beeld van de warmte. Vooral het gas laat in die zin het beeld van de warmte zien. Als de stof echter de warmtesfeer afstoot, zich er van emancipeert, ontstaat uiterlijke warmte: de warmtesfeer maakt zich los van de stof. In tabel 5 is alles nog eens schematisch weergegeven.

In verband met het hiervoor ontwikkelde gezichtspunt willen we nog eens nader ingaan op het gas en de vaste stof. We bekijken hun verhouding tot de vier warmtefenomenen.

Gas heeft een grote warmteverbondenheid; daarnaast geeft het een beeld van de warmte;

- is doorzichtig voor warmtestraling;
- is ongedifferentieerd in de uitzetting: alle gassen hebben dezelfde uitzettingscoëfficiënt;
- is een slechte warmtegeleider: het isoleert zich niet van de warmtesfeer.

Het gas geeft met andere woorden vooral de saturnus- en de zonnefase weer.

Vaste stof heeft een kleine warmteverbondenheid;

- is ondoorzichtig voor warmtestraling;
- vertoont een grote differentiatie in uitzettingscoëfficiënten, heeft een sterk extensief karakter;
- is een goede warmtegeleider.

De vaste stof vertegenwoordigt dus vooral de maan- en aardfase. De vloeistof neemt in dit alles een middenpositie in. In zijn totaliteit ontstaat

een zeer coherent beeld, zeker als men bedenkt dat het gasachtige zich heeft gevormd tijdens de zonnefase, het vloeibare tijdens de maanfase en de vaste stof en het water tijdens de huidige aardfase.

Van de in deze paragraaf geïntroduceerde vierdeling in processen volgen hier nog enige voorbeelden:

1. *Mee-proces*: het streven de aanwezige tendens te volgen.
 - a. Verbrandingsprocessen. Een stof wil graag branden zolang de voorwaarden vervuld zijn.
 - b. Inkrimping/uitzetting. Een stof gaat met de warmtetendens mee.
 - c. Straling/reflexie. Een voorwerp wordt warm en gaat ook stralen.
 - d. Gassen lossen op in elkaar. Diffusie van waterstof en koolzuur of jodiumdamp met lucht.
 - e. Idem voor vloeistoffen en vaste stoffen, bijvoorbeeld:
 - lood en goud op elkaar leggen;
 - diffunderen van koolstof in ijzer om oppervlakteharding mogelijk te maken;
 - water en alcohol mengen volledig (totaal volume neemt af, wat wijst op een gastendens).
 - f. Colloïdale oplossingen zijn in voortdurende beweging (Brownse beweging, laat warmteverbondenheid zien).

De voorbeelden d t/m f laten een warmte/gastendens zien waarbij beweging en eenwording karakteristiek zijn.
2. *Proces en tegenproces*: streven naar evenwicht door behoudendheid en tegenwerking.
 - a. Verdamping geeft afkoeling.
 - b. Samenpersing geeft verhitting.
 - c. Magnetrostrictie, inkrimping van stoffen door magnetisme, geeft verhitting. Dit proces wordt toegepast bij zeer lage temperatuur om afkoeling te bewerkstelligen door demagnetisatie.
 - d. Idem electrostrictie.
 - e. Kristallisatie van een oververzadigde vloeistof geeft verhitting.
3. *Polaire processen*: een wisselwerking tussen verwante doch tegengestelde krachten (dubbele natuur).

- | | | |
|------------------|---|----------------------|
| a. Thermokoppel: | { | warmte |
| | } | elektrische spanning |

- b. Wrijven van twee platen: $\left\{ \begin{array}{l} \text{warmte} \\ \text{elektrisch veld} \end{array} \right.$
 - c. Foto-elektrisch effect: $\left\{ \begin{array}{l} \text{licht} \\ \text{elektrisch veld} \end{array} \right.$
 - d. Gesloten elektrische kring: $\left\{ \begin{array}{l} \text{warmte (bovennatuur)} \\ \text{magnetisme (ondernatuur)} \end{array} \right.$
4. *Duale processen*: de afhankelijkheid en verwevenheid van natuurkrachten valt uit elkaar (scheiding).
- a. Radioactiviteit onafhankelijk van natuurkundige en chemische veranderingen.
 - b. Suprageleiding, toont zich onder de suprageleidingsgrens onafhankelijk van de temperatuur, in tegenstelling tot de gewone elektrische geleiding.
 - c. Curie temperatuur. Ferromagnetisme kan boven deze temperatuur niet werkzaam zijn.
 - d. Drukveranderingen boven de kritische temperatuur veroorzaken geen faseovergangen.

Ook psychologisch is deze ordening van vier processen een steun om de volledige mens te doorgronden. Ook de samenhang met de fenomenologie, ontwikkelingspsychologie en aarde-evolutie sluiten hier direct bij aan.

1. *Mee-proces*:
Nabootsen, zoals dat in de kinderleeftijd een centrale rol speelt. In de fenomenologie is het waarnemen, het meebewegen en eenworden met de natuur een mee-proces.
2. *Proces en tegenproces*:
Het gaat om evenwicht in de zieleprocessen dat door sympathie en antipathie heen bereikt moet worden.
Het ontwikkelen van waarheidsgetrouwe voorstellingen van de uiterlijke wereld is het psychische proces dat voortdurend heen en weer beweegt tussen de zielekrachten sympathie en antipathie, tussen objectieve werkelijkheid en subjectieve gevoelens en gedachten.

3. *Polaire processen:*

De hogere en lagere zielekrachten spelen een belangrijke rol in de derde levensfase van 14 t/m 18 jaar. Idealen en begeerten bewegen door elkaar heen en roepen elkaar wederkerig op, zoals idealisme en hoogmoed, zorgzaamheid en ijdelheid, betrokkenheid en uiterlijke schijn. Fenomenologisch ontwikkelen begrip en waarneming zich naast en aan elkaar.

4. *Duale processen:*

De volwassenheid komt tot uitdrukking in een verzelfstandiging van de zielekrachten denken, voelen en willen. Alle extremen en eenzijdigheden hiervan zijn in de huidige maatschappij zichtbaar. Deze uiteengevallen zielekrachten zouden door het hogere ik weer geïntegreerd moeten worden.

Waarneming en idee kunnen uit elkaar vallen, zoals bij het modeldenken het geval is. Ook al is de idee ten opzichte van de waarneming zelfstandig, toch zal in de fenomenologie de band met de waarnemingswereld en het causale begrip niet verloren mogen gaan. De mens zal vanuit zijn eigenlijke zelf deze band moeten creëren, anders valt de wereld uiteen in uiterlijk en innerlijk en wordt de schepping wezensloos.

4.9.5 Projectieve meetkunde

In deze paragraaf wordt een inleiding in de projectieve meetkunde gegeven, die de mogelijkheid biedt om enige toepassingen op het gebied van de warmte nader te bekijken. Voor de verder geïnteresseerde lezer wordt verwezen naar de vakliteratuur.

De klassieke euclidische meetkunde is gebaseerd op een ruimtebeschouwing, waarin de oneindigheid als begrip geen betekenis heeft. De ruimte wordt beleefd en beschouwd vanuit het gevulde centrum en niet vanuit de omhullende periferie. Tussen de meetkundige basiselementen punt, lijn en vlak bestaat in deze opvatting een principieel verschil in die zin, dat een punt een in zichzelf gesloten element vormt, terwijl lijn en vlak door hun onbegrensdeheid zich ten dele aan het zicht onttrekken en daardoor niet geheel grijpbaar zijn. Pas als lijnen tot lijnstukken en vlakken tot begrensde vlakdelen zijn gereduceerd, is er weer houvast en evenwicht. De euclidische meetkunde houdt zich dan ook bezig met de wetmatigheden van begrensde figuren.

De projectieve meetkunde onderscheidt zich van de euclidische meetkunde doordat het oneindige als hanteerbaar begrip in de beschouwing betrokken wordt. Breekijzer in deze doorbraak is het beroemde parallellenpostulaat van Euclides geweest, dat stelt dat twee evenwijdige lijnen, hoever ook verlengd, elkaar niet snijden. Tot in de 18e eeuw hebben wiskundigen getracht dit postulaat te bewijzen om het als bewezen stelling in het wiskundige bouwwerk te kunnen opnemen. Tegenwoordig aanvaardt men het als een feit, dat deze stelling in het stelsel van Euclides niet bewijsbaar is en daarom wel als postulaat moet gelden.

Vanaf het moment dat dit erkend was, was de weg vrij om naast de euclidische meetkunde andere meetkundige stelsels te ontwerpen, waarbij het parallellenpostulaat door een ander postulaat wordt vervangen. De eerste stap op deze weg werd reeds gezet door Girard Desargues (1593-1662), een tijdgenoot van René Descartes. Maar echt tot ontwikkeling kwam de projectieve meetkunde pas door Victor Poncelet (1778-1867), toen deze, na de mislukte russische veldtocht van Napoleon, van 1812 tot 1813 in russische gevangenschap zat en ver weg van huis en haard de eenzaamheid verdreef door zich met meetkunde bezig te houden. Door de relaties te beschouwen tussen de drie basiselementen punt, lijn en vlak, waarbij door de activiteiten snijden en verbinden meetkundige configuraties ontstaan, bemerkte hij een bepaalde symmetrie, die slechts bij situaties van evenwijdigheid verstoord werd. Door aan twee evenwijdige lijnen één gemeenschappelijk punt toe te kennen, dat oneindig ver gedacht moet worden, net zoals twee snijdende lijnen één gemeenschappelijk punt in het eindige hebben, en aan twee evenwijdige vlakken één gemeenschappelijke oneindig ver gelegen rechte lijn, zoals twee snijdende vlakken één in het eindige liggende gemeenschappelijke snijlijn hebben, kon hij die verstoring opheffen. Door de introductie van het oneindige kon dus de uitzonderingspositie van de evenwijdigheid weggenomen worden en ontstond een volledige wederkerigheid in de betrekkingen tussen punt, lijn en vlak. Ter illustratie twee voorbeelden.

1. Zoals twee lijnen die door één punt gaan altijd één vlak bepalen (hun verbindingsvlak), zo bepalen twee lijnen die in één vlak liggen altijd één punt (hun snijpunt). Soms ligt dit snijpunt in het eindige, soms oneindig ver weg. In de euclidische meetkunde spreken we in het eerste geval van snijdende lijnen, in het tweede van evenwijdige lijnen; in de projectieve meetkunde is dit verschil niet relevant.
2. Zoals twee punten altijd één rechte lijn bepalen (hun verbindingslijn), zo bepalen twee vlakken ook altijd één rechte lijn (hun snijlijn). Soms ligt die snijlijn in het eindige, soms oneindig ver weg. Euclidisch

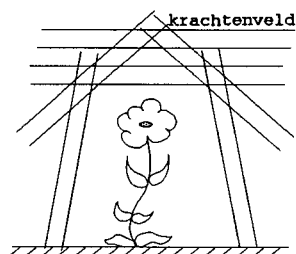
gezien spreken we in het eerste geval van snijdende vlakken, in het tweede van evenwijdige vlakken; projectief geometrisch gezien gaat het hier om eenzelfde situatie.

Door in de projectieve meetkunde het oneindige een even grote realiteit toe te kennen als het eindige, krijgen de grondelementen punt, lijn en vlak een gelijkwaardige plaats. Daarbij staan, in de ruimte, punt en vlak polair tegenover elkaar en neemt de lijn een middenpositie in. Dit biedt ten aanzien van toepassingen in de natuurkunde de mogelijkheid om naast centrum/puntgerichte krachten - zoals de gravitatie - ook perifeer gerichte krachten - zoals de warmte - te beschrijven. Het opent de mogelijkheid om het bewustzijn te verwijden en de ruimte niet alleen meer vanuit het gevulde centrum, maar ook vanuit de omhullende periferie te beschouwen. In de positivistische natuurwetenschap is het modellen denken helemaal gestoeld op het benadrukken van de vulling. Toch geeft de atoomvoorstelling van kern en elektronen de oerpolariteit van de ruimte weer die in de projectieve meetkunde gefundeerd is.

Een belangrijke hedendaagse onderzoeker, Rupert Sheldrake, heeft in zijn boek *A New Science of Life - The hypothesis of formative causation* naar voren gebracht, dat vanuit waarnemingen in de plantenwereld zich het denkbeeld opdringt van morfogenetische velden, die om de aarde werkzaam zijn. Hier wordt een stap gedaan om de ruimte als totaliteit te doorgronden. De volledige ruimte ontstaat door de polariteit van centrum (punt) en oneindigheid (vlak), waarbij de oneindigheid geen verstrooiing van onsamenhangende richtingen is, naar een coherent geheel. Ruimte openbaart de polariteit:

verschijning < --- > krachtenveld

punt	vlak
centrum	oneindigheid
gevuld	omhullend



Figuur 67

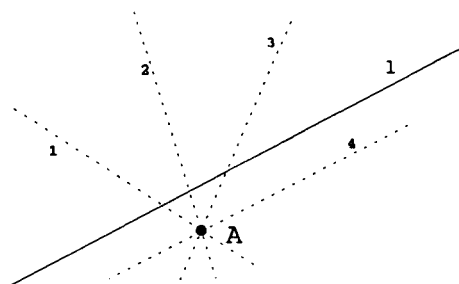
Krachtenvelden hoeven niet alleen zintuiglijke waarnemingen begripsmatig toegankelijk te maken, zoals bij licht, warmte, elektro/magnetische velden en dergelijke, maar kunnen ook 'denkend-waarneembaar' zijn, zoals de morfogenetische velden van Sheldrake. Het denken voert de mens niet tot lege communicatiebegrippen, maar tot realiteiten die niet

met de uiterlijke zintuigen te vatten zijn. Deze realiteiten kunnen zowel betrekking hebben op kristallijne structuren, op vormen in de plantenwereld, als op psychologische en geestelijke aspecten van de menselijke ziel.

Er is voldoende literatuur verschenen om de projectieve meetkunde op verschillende niveaus te leren kennen.* Enkele facetten eruit zullen hier aangehaald worden om denkactiviteiten te oefenen die nodig zijn bij het begrijpen van warmtefenomenen.

1. Maak de volgende voorstelling:

Plaats in één (onbegrensd) vlak een rechte lijn en een lijnenwaaier (∞ veel lijnen door één punt).



Figuur 68

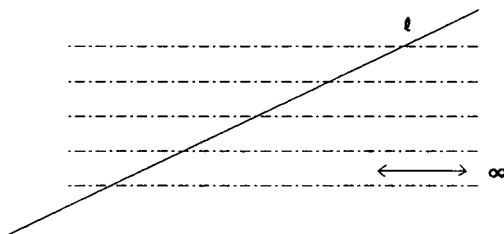
Iedere lijn van lijnenwaaier A zal l snijden in een punt. A_4 en l zijn evenwijdig en snijden elkaar dus in een oneindig ver gelegen punt. Omdat men in de lijnenwaaier zowel linksom als rechtsom tot A_4 kan komen, kan men het oneindig verre snijpunt van A_4 en l zowel linksgaand als rechtsgaand benaderen. De lijn l heeft dus één oneindig ver punt, dat niet door een plaats maar door een *richting* gekenmerkt is. Op deze wijze is een lijn onbegrensd en toch *gesloten*; dat wil zeggen, wanneer men zich over de lijn beweegt in een bepaalde richting komt men, door denkend als maar rechtdoor te gaan, op de uitgangsplaat terug.

Het snijpunt in het eindige is voorstelbaar. Het snijpunt in het oneindige is denkbaar. Iedere keer wanneer deze activiteit van het snijden wordt voltrokken, wordt innerlijk de overgang gemaakt van het voorstelbare naar het denkbare, waarbij aan beide evenveel realiteitswaarde wordt toegekend. Het continu draaien van lijnenwaaier A

* Zie bijvoorbeeld Louis Locher Ernst: *Raum und Gegenraum*.

geeft een versnelling c.q. vertraging van het snijpunt op l . De grootste versnelling gaat samen met de omslag van het voorstelbare naar het denkbare. De grootste vertraging valt samen met het gemakkelijk eindige voorstelbare.

2. Maak de volgende denkende voorstelling:
Neem in een vlak een lijn l en een lijnenwaaier B waarvan het punt in ∞ ligt.



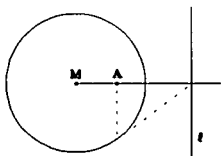
Figuur 69

Alle lijnen van lijnenwaaier B (die onderling evenwijdig zijn omdat ze elkaar snijden in een oneindig ver punt) hebben een snijpunt met de lijn l . Ook het oneindig verre punt Q_∞ van l moet zo'n snijpunt zijn. Q_∞ kan alleen het snijpunt zijn van l en de oneindig verre lijn van het vlak waarin B ligt. De oneindig verre lijn maakt dus deel uit van de lijnenwaaier B.

3. Plaats één punt in een vlak:
Hoewel er in de projectieve meetkunde vooreerst nog niet gemeten wordt, kan gezegd worden dat dit ene punt meetkundig midden in het vlak staat.
Bij voorstellende-denkoefeningen blijft het menselijk bewustzijn tegenover het voorgestelde beeld staan, zoals een punt tegenover een vlak. Zoals ieder punt in het vlak het meetkundige midden vormt, zo doet het dat ook in de ruimte.

De polaire toegevoegde in het vlak en in de ruimte

- | | |
|---|--|
| 1. Isoleer in één <i>vlak</i> een eenheidscirkel. | 1. Isoleer in de <i>ruimte</i> een bol met straal 1. |
|---|--|



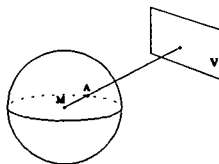
Figuur 70

Ieder punt P in de cirkel hangt samen met een lijn l buiten de cirkel en omgekeerd (raaklijnenconstructie). Als het punt P op afstand r van het midden M ligt en de lijn l op afstand R , dan kan men bewijzen dat geldt: $r \cdot R = 1$.

Beweegt het punt P binnen de cirkel naar de rand, dan beweegt ook lijn l naar de rand van de cirkel toe; beweegt punt P naar het midden M, dan nadert l steeds meer tot de oneindig verre lijn van het vlak. Bij M hoort polair toegevoegd l_{∞} die recht, oneindig en gesloten is en in alle richtingen uitgaande van M gevonden wordt.

Alle punten die tezamen in de cirkel liggen vormen de *kern*, alle polair toegevoegde lijnen vormen de *omhullende*. Zoals is gebleken is M het centrum van het kerngebied. Dienovereenkomstig is de oneindig ver gelegen rechte het centrum van de omhullende.

Beweegt men een punt van het kerncentrum M naar de cirkelrand, dan zal de polair toege-



Figuur 71

Ieder punt A binnen de bol hangt polair samen met een vlak V buiten de bol en omgekeerd (raakvlakkenconstructie). Ook hier geldt: is $AM = r$ en de afstand van M tot het vlak R , dan geldt $r \cdot R = 1$.

Bij elk punt in de bol hoort dus ook een polair toegevoegd vlak. Het polair toegevoegde vlak van M is een vlak dat in alle richtingen oneindig ver weg ligt en toch plat is. We noemen dit vlak het oneindig verre vlak of kortweg het grensvlak.

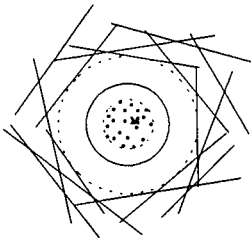
Alle punten binnen de bol vormen de *kern*, terwijl alle toegevoegde vlakken tezamen de *omhullende* vormen. Als centrum van de kern geldt het midden M van de bol, terwijl het grensvlak het centrum van de omhullende is.

Beweegt men een punt van het kerncentrum M naar het boloppervlak, dan zal het polair toege-

voegde lijn van de oneindig ver gelegen lijn naar de cirkel toe bewegen. Is het punt op de rand van de cirkel aangekomen, dan raakt de polair toegevoegde lijn de cirkel in dit punt. Kernpunten op de cirkelrand en de daarbij behorende omhullende grenzen aan elkaar. Verlaat een punt de binnenruimte van de cirkel, dan zal de toegevoegde lijn de cirkel binnendringen.

2. Neem nu steeds punten, die op dezelfde afstand van M liggen en dus een cirkel vormen met straal r . De bijbehorende lijnen omhullen dan een cirkel met straal R . Noem het gebied van de puntencirkel de kern en het gebied van de omhullende lijnen de omhullende. We onderscheiden nu weer drie gevallen:

a. $r < 1$. De kern valt binnen de cirkel en de omhullende er buiten.



Figuur 72

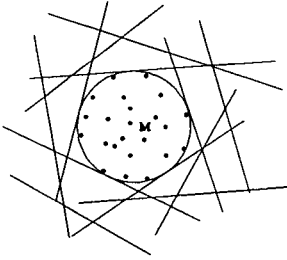
voegde vlak van het grensvlak naar de bol toe bewegen. Is het punt op het boloppervlak aangekomen, dan raakt het polair toegevoegde vlak de bol in dit punt. Alle kernpunten op de bolrand hebben als bijbehorende omhullende de verzameling van vlakken die de bol raken. Verlaat een punt de binnenruimte van de bol, dan zal het toegevoegde vlak de bol binnendringen.

2. De overeenkomstige ruimtelijke oefeningen worden niet beschreven. Zij verlopen analoog, maar zijn lastig te tekenen.

Toepassing ten aanzien van de warmte.

Zoals eerder in paragraaf 4.6 werd aangeduid zullen we als mathematische beschrijving voor de warmtesfeer de omhullende kiezen, terwijl de stofwereld voorgesteld wordt door de kern. De linker situatie kan worden verbonden met de vaste stof fase en diens verhouding tot de warmtesfeer. De vaste stof is sterk geëmancipeerd van de warmtesfeer.

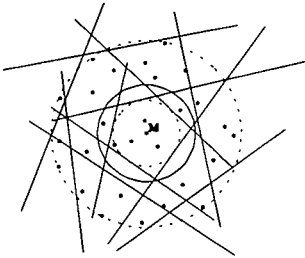
b. $r=1$. Kern en omhullende raken elkaar op de cirkelrand.



Figuur 73

Nadat de vaste stof gesmolten is tot vloeistof geldt een andere verhouding tot de warmtesfeer. De vloeistof is nog niet één met de warmtesfeer, maar is er duidelijk minder geëmancipeerd van.

c. $r>1$. De kern en de omhullende zijn door elkaar heen bewogen, de kern naar buiten, de omhullende naar binnen.



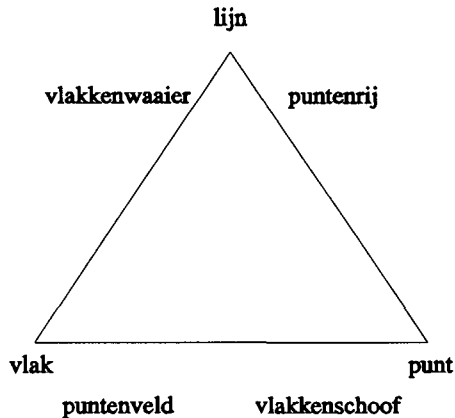
Figuur 74

Nadat de vloeistof verdampt is tot gas is de stof veel meer één geworden met de warmtesfeer. De stof is intensief van de warmtesfeer doordrongen.

3. Als speciaal geval van omhullende en kern zullen we een kubusachtige kern beschouwen met zijn polair toegevoegde omhullende. Vervolgens zullen we zien dat dit kern-en-omhullende paar zich laat gebruiken om daarmee het smelten van de vaste stof nader te beschouwen. We bouwen de gedachtengang in stappen op.
 - a. Eerst nemen we het boven reeds genoemde polariteitsprincipe bij de grondelementen punt, lijn en vlak nader onder de loep. We geven nog eens een paar voorbeelden ter illustratie:
 1. Drie punten die niet op één lijn liggen laten zich verbinden tot één vlak: het verbindingsvlak. Drie vlakken die niet door één lijn gaan snijden elkaar in één punt: het snijpunt.

2. Twee punten hebben één lijn en alle vlakken die tot deze lijn behoren met elkaar gemeen; de vlakken vormen samen een *vlakkenwaaier*. Twee vlakken hebben één lijn en alle punten die tot deze lijn behoren met elkaar gemeen; de punten vormen samen een *puntenrij*.

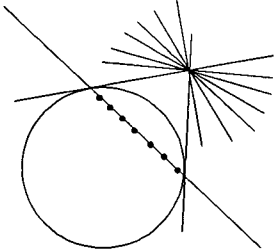
Uit deze en andere voorbeelden blijkt opnieuw, dat punt en vlak in de ruimte tegengestelde of polaire elementen zijn en de lijn een verbindende middenschakel vormt. Ook tussen uit meerdere elementen samengestelde figuren als vlakkenwaaier en puntenrij blijkt deze polariteit te bestaan. Het polariteitsprincipe wordt ook wel met het woord dualiteit aangegeven. Dat verwijst echter naar een tweehed van tegenover elkaar staande elementen, terwijl het hier om een drieheid gaat. Het woord polariteit heeft daarom de voorkeur. Hieronder volgt een overzicht van polaire elementen en grondvormen:



Figuur 75

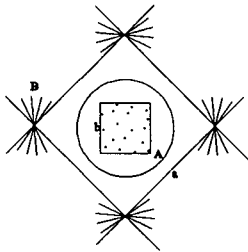
Het overzicht is geenszins compleet, alleen die elementen die nodig zijn voor het vervolg zijn opgenomen. Ter toelichting: een puntenveld is een verzameling punten, die gezamenlijk een vlak vormen; een vlakkenschoof is een verzameling vlakken, die allen door één punt gaan. Ook puntenveld en vlakkenschoof zijn polair, zodat het schema geheel symmetrisch is opgebouwd: polaire elementen staan horizontaal tegenover elkaar; de lijn is zoals gezegd neutraal. Bovenstaande geldt voor de driedimensionale ruimte. Bij betrekkingen in het platte vlak staan punt en lijn polair tegenover elkaar.

- b. Een eindige puntenrij in een cirkel bepaalt een onvolledige lijnenwaaier erbuiten en omgekeerd.



Figuur 76

- c. Een begrensld puntenveld heeft als polair toegevoegde een lijnenveld.



Figuur 77

Hoekpunt A heeft als toegevoegde lijn a.
Puntenrij b heeft als toegevoegde lijnenwaaier B.

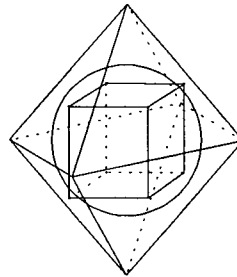
- b. Een eindige puntenrij in een bol bepaalt en onvolledige vlakkenwaaier erbuiten en omgekeerd.

Polariteit in de ruimte:

Puntenrij (alle punten op een lijn).

Vlakkenwaaier (alle vlakken door een lijn).

- c. idem in de ruimte met een puntenkubus en een begrensde vlakkenruimte:
- Een hoekpunt heeft als toegevoegde een vlak.
 - Een puntenrij (ribbe) heeft als toegevoegde een vlakkenwaaier.
 - Een puntenveld (vlak) heeft als toegevoegde een vlakkenschoof.



De polair toegevoegde van een kubus is een octaëder.

In plaats van een statische kunnen we een bewegende kubus polariseren.

- Wordt de kubus groter of kleiner dan beweegt de omhullende octaëder omgekeerd mee.
- Een grotere kubus geeft een dichtere omhulling door de octaëder.
- Raken de hoekpunten de bol, dan raken de vlakken van de octaëder ook precies de bol.
- Lost de kubus op tot een bol, dan ook de octaëder.
- Komen de hoekpunten van de kubus buiten de bol, dan doorsnijden de vlakken van de octaëder de bol.

Wat de elementen betreft vinden we de volgende betrekkingen:

- Een hoekpunt van de kubus toont de meeste openheid en verbinding naar de omhullende vlakkenruimte.
- Een vlak van de kubus staat tegenover een stuwing van vlakken van de octaëder in een punt.
- Een ribbe van de kubus staat tegenover een stuwing van vlakken van de octaëder om een lijn die de ribbe loodrecht kruist.

Uit het bovenstaande blijkt dat de kubus-vormige kern en de octaëdrische omhullende polaire structuren zijn. Tegenover een hoekpunt van de kubus staat een vlak van de octaëder, tegenover een ribbe van de kubus een ribbe van de octaëder, tegenover een vlak van de kubus een hoekpunt van de octaëder. Deze polariteit vinden we ook terug in de stelling van Euler voor ruimtelijke lichamen:

$$H + V = R + 2$$

(H = aantal hoekpunten, V = aantal vlakken, R = aantal ribben)

	<i>kubus</i>	<i>octaëder</i>
H	8	6
V	6	8
R	12	12

Ook in dit overzicht blijken hoekpunten en vlakken van kubus en octaëder polair. De lijn - de ribbe - blijkt ook hier het evenwichtige midden te vertegenwoordigen.

d. *Toepassing op de fase-overgang vaste stof - vloeibaar*

We stellen ons een vaste stof voor met een kubusvorm, met de afmetingen $l \times b \times h$ en temperatuur T . Het meeprocess van de uitzetting verloopt nu als volgt (vergelijk ook Rudolf Steiner: *Zweiter naturwissenschaftlicher Kurs*, tweede voordracht):

Door verwarmen zal

- de lengte toenemen met $l = \alpha \cdot l \cdot \Delta T$ (α = uitzettingscoëfficiënt)
- de breedte toenemen met $b = \alpha \cdot b \cdot \Delta T$
- de hoogte toenemen met $h = \alpha \cdot h \cdot \Delta T$

De totale lengte wordt dan $l + \alpha \cdot l \cdot \Delta T = l (1 + \alpha \cdot \Delta T)$

De totale breedte $b + \alpha \cdot b \cdot \Delta T = b (1 + \alpha \cdot \Delta T)$

De totale hoogte $h + \alpha \cdot h \cdot \Delta T = h (1 + \alpha \cdot \Delta T)$

Het oorspronkelijke volume is $V_1 = lbh$ en het nieuwe volume is $V_2 = lbh (1 + \alpha \Delta T)^3$

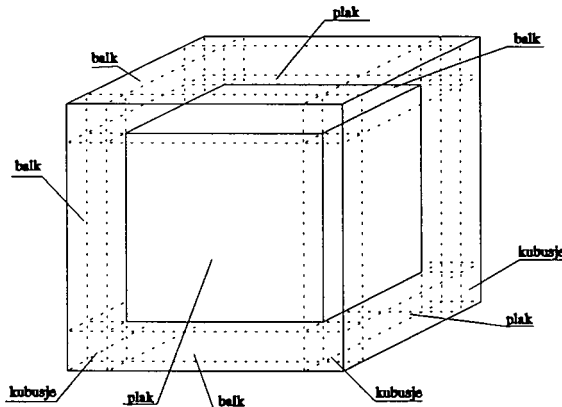
ofwel $V_2 = lbh (1 + 3\alpha\Delta T + 3\alpha^2\Delta T^2 + 3\alpha^3\Delta T^3)$
 ruimtelijk: grote kubus 3 plakken 3 balken 1 kleine kubus

Door nu aan alle vlakken de uitzetting te laten plaatsvinden en de uitzetting over een lengte symmetrisch te verdelen

$$l_1(1 + \Delta T) = l_1 (1 + 2[\frac{1}{2}\alpha\Delta T])$$

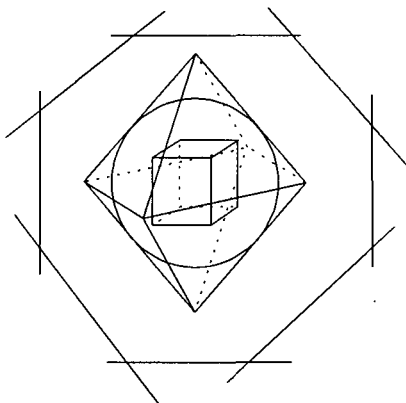
kan men bewijzen dat voor het uitgezette volume geldt:

$V_2 = lbh (1 + 6[\frac{1}{2}\alpha\Delta T] + 12[\frac{1}{2}\alpha\Delta T]^2 + 8[\frac{1}{2}\alpha\Delta T]^3)$
 ruimtelijk grote kubus 6 plakken 12 balken 8 kleine kubusjes



Figuur 78

Door nu de warmtesfeer als krachtsfeer om de kubus voor te stellen als de polair toegevoegde ontstaat het volgende beeld:



Figuur 79

Het polair toegevoegde volume van de door de stof gevulde kubus is de totale ruimte buiten de octaëder. (Vanuit de warmtesfeer gezien is dit de ruimte binnen de octaëder, namelijk de ruimte rond het centrum c.q. het grensvlak). In het beeld is de kubus de substantie en de octaëder de grens van de warmtesfeer. Zet de kubus door verwarming uit, dan wordt de octaëdrische begrenzing kleiner, sluit dus steeds beter aan rond de kubus. Gaat nu de vaste stof smelten, dan kan men zich dat in het bovenstaande beeld voorstellen als het moment dat de octaëdrische begrenzing de kubus raakt. Dit gebeurt het eerste aan de hoekpunten van de kubus, zoals een vaste stof ook het eerste aan de hoekpunten smelt. De octaëder die precies aan de bol raakt, terwijl de kubus de bol van binnen raakt, is het beeld voor de vloeistof-fase. De vlakken van de warmtesfeer/octaëder hangen dus juist het sterkste samen met de hoekpunten van de kubus. Terwijl kwantitatief de factor $(\alpha\Delta T)^3$ in de formule van het uitgezette volume het meest onbeduidend is, vertegenwoordigen de hoekpunten van de kubus, die zoals we hebben gezien juist met deze factor samenhangen, in kwalitatieve zin het meest wezenlijke verband met de warmtesfeer.

Uit de toepassingen ten aanzien van het verband tussen warmte en substantie, die in deze paragraaf beschreven staan, blijkt de polariteit van vlakkenruimte (omhullende) tegenover puntruimte (kern) een belangrijke aanvulling te zijn op het in de natuurwetenschappen gangbare puntgerichte denken. In aansluiting op wat in paragraaf 4.6.2 over de drieslag warmtefenomeen, stralingsveld en warmtesfeer (kracht) werd beschreven kan

deze driedeling nog in samenhang gebracht worden met het polariteits-principe. Het fenomeen is tastbaar en ruimtelijk en laat zich beschrijven als kerngebied. De warmtesfeer of warmtekracht is onruimtelijk en laat zich beschrijven als vlakkenruimte/omhullende. Het warmtestralingsveld is radiaal en laat zich als lijnenveld beschrijven. Het veld verbindt het ruimtelijke met het onruimtelijke, het eindige met het oneindige en neemt - net als de lijn tussen punt en vlak - een tussenpositie in:

<i>fenomeen/tast</i>	<i>veld</i>	<i>kracht/sfeer</i>
punt	lijn	vlak
ruimtelijk	ruimte	onruimtelijk

4.9.6 De warmteleer in historisch perspectief

De geschiedenis van de mensheidsontwikkeling, zoals deze vanuit een spirituele visie beschreven kan worden, laat een emancipatieproces zien van verbonden zijn met het geestelijke - waarbij de mens zich gedragen en geborgen voelde door geestelijke machten - tot individuele zelfstandigheid. Deze ontwikkeling weerspiegelt zich in die van de warmteleer. Een aantal markante overgangstijden typeren de gestaag verlopende bewustzijnsontwikkeling.

In de tijd tot en met Plato (430-347 v.Chr.) was het voor de leidende klasse van de mensheid nog een normaal vermogen om naast het uiterlijke waarnemen de wereld in zijn geestelijke grondvesten te schouwen. Men leefde in de directe aanschouwing en beleving van verschijnselen, de wereld werd nog niet in *begrippen* doorgrond. Dit directe geestelijke aanschouwen moest plaatsmaken voor de ontwikkeling van het zelfstandige denken en het exacte uiterlijke waarnemen. Dit proces heeft eeuwen geduurd en er zijn tot in onze tijd resten van te vinden. Plato leefde ook nog in de uiterlijke én innerlijke aanschouwing, maar hij schouwde het geestelijke al in de vorm van ideeën. Het beleven van de oerideeën van de schepping is de eerste fase van het afsnoeringsproces dat plaatsvindt vanaf de griekse tijd. Aristoteles (384-322 v.Chr.) wordt gezien als het omslagpunt en tevens als het startpunt van de waarnemingswetenschap. Zo wordt verteld dat Aristoteles voor het eerst doelbewust waarnam dat een vlieg zes poten heeft.

Voor de Grieken, maar ook nog voor de middeleeuwen, was de ruimte het 'sensorium Dei': de ruimte was gevuld en doortrokken met geestkrachten, zielewezens, levenskrachten, elementenkrachten en elemen-

tenwezens als kabouters en elfen. De Grieken beleefden het goddelijke nog in de natuur, terwijl in de middeleeuwen de natuur bestudeerd werd door middel van de griekse geschriften en men het goddelijke in zichzelf vond en steeds minder in de wereld. Voor de Grieken lagen innerlijk beleefbare aanschouwing en inzichten door middel van het denken nog dicht bij elkaar. In de loop van de tijd loopt dit uiteen en na de middeleeuwen ontstaat de tweespalt tussen geloven en weten.

Voor de Grieken was warmte het vuurelement, het omvangrijkste van de vier elementen, dat alles doordringt. De hele ruimte is doortrokken van deze kracht. Als vijfde element gold de lichtether, die met de zonnesfeer samenhangt. De lichether was bepaald niet synoniem met het uiterlijk licht, het was eerder te vergelijken met het licht dat uit de ogen straalt. Het was de 'quitessens', de wezenlijke kern der dingen.

Toen de mensheid rond 1500 in een nieuwe fase kwam en het geestelijke wel in zichzelf, maar niet meer in de wereld beleefde, werden de natuurverschijnselen steeds sterker mechanistisch verklaard. Kwaliteiten werden op kwantiteiten teruggevoerd, daar de innerlijke aanschouwing verloren was gegaan en het denken nog niet ver genoeg ontwikkeld was om spirituele ideeën te vormen. Zo hield men zich bij het bestuderen van warmteverschijnselen grondig bezig met het fenomeen van de uitzetting en de ontwikkeling van een ijkbare thermometer, waarbij men, zoals in de Renaissance op alle wetenschapsgebieden het geval was, aansluiting zocht bij de griekse geschriften en de thermoscoop van Aeron en Philon nabouwde.

In de 17e eeuw speelde de Academie del Cimento (academie van de proeven, 1657-1663) een belangrijke rol aan de wieg van vele nieuwe ontwikkelingen. Vanaf dat moment is onder andere voor het vastleggen van de temperaturen de uitzetting van gas vervangen door de uitzetting van een vloeistof. Pas in de 18e eeuw stelde D. Fahrenheit voor om hiervoor kwik te gebruiken (1714) en in 1743 werd op advies van de botanicus C. von Linné de huidige celsius schaal gekozen. Nog weer een eeuw later, in 1848, werd door Lord Kelvin het absolute nulpunt ingevoerd, dat ontwikkeld was vanuit de gasthermometer.

In aansluiting op de temperatuurmetingen, die vooral toepassing vonden bij de weerkunde, werden metingen en onderzoeken gedaan naar wat wij nu calorimetrie noemen. Zo formuleerde J. Black (1728-1799) het fenomeen van de latente warmte bij het smelten van ijs en het verdampen van water. In 1818 vonden Dulong en Petit dat het warmtegetal vermenigvuldigd met het molgewicht de constante waarde 6,2 opleverde voor zeer vele zuivere vaste stoffen. Dit gaf een impuls aan het moleculaire modeldenken.

Al deze ontwikkelingen kunnen nog onder de noemer fenomenologische warmteleer vallen. Een grote omkeer vond plaats toen S. Carnot (1796-1832) zich als zoon van de minister van oorlog ging bezighouden met warmte en warmtemachines om de economie tot bloei te brengen. Hij ging ervan uit dat warmte een substantie was zonder massa en duidde die aan met 'calorique'. Deze warmtesubstantie, door J. Becher en G. Stahl in de 17e eeuw reeds 'phlogiston' genoemd, kon niet ontstaan of vergaan, maar wel een hogere of lagere temperatuur hebben, net zoals stromend water van hoog naar laag kan vallen en arbeid kan leveren. In 1824 verscheen zijn boek en werd de toon gezet voor de volgende eeuwen. Het 'calorique' lijkt nog een beetje op de warmte-ether van de Grieken. Vele volgelingen echter wilden dit 'calorique' tot waarneming maken, zoals men de lichtether ook heeft willen waarnemen. Dit is echter onmogelijk, daar het een aanschouwelijk begrip is. Nog geen vijftig jaar later heeft het reeds afgekalfde begrip *calorique* of *phlogiston* plaats gemaakt voor het algemene begrip 'energie'.

Tussen 1843 en 1848 deed J.P. Joule zijn proeven om de equivalentie tussen warmte en arbeid vast te stellen en kwam uiteindelijk met de formulering: warmte is een vorm van energie. Terwijl in 1846 Lord Kelvin nog zegt dat de fysica de wetenschap is van krachten (kwaliteiten), gaat hij enige jaren later toch mee in de gedachte van Joule dat warmte een bepaalde hoeveelheid *omzetbare* energie is. Hij kon dit rijmen met zijn religieuze gevoelens door te stellen dat 'God de wereld bij de schepping een hoeveelheid energie heeft geschonken en dat de vergankelijke verschijnselen komen en gaan door kwaliteiten (krachten). Maar dat het manifestaties zijn van deze éénmaal geschonken energie.' Kelvin had een afkeer van het deeltjesdenken, maar kon ook niet vatten wat warmte dan wel was. In 1865 schrijft R. Clausius (1822-1888) een boek over entropie, waarin hij aangeeft dat de warmte-energie niet zomaar als een loos begrip in de lucht zweeft, maar ontstaat door de ongeordende beweging van de moleculen van de stof.

Was bij de Grieken de warmte een imponderabele omvattende eeuwige kwaliteit die werkzaam was tot aan de maansfeer, nu is de warmte gereduceerd tot een secundair verschijnsel dat samenhangt met de allerkleinste hypothetische deeltjes (de leer van de thermodynamica). De *kwaliteit* warmte is natuurlijk niet uiterlijk waarneembaar, maar alleen innerlijk als idee. Door echter de realiteit van de idee warmte te ontkennen, is men genoodzaakt een hypothetische waarneming te creëren in de vorm van chaotische deeltjes. Ook hier komt de grote tweespalt naar voren die door de ontwikkelingen van de laatste jaren steeds actueler wordt:

- men wil de natuur verklaren met kwantitatieve definieerbare modellen;
- men wil de natuur ontmoeten en op zoek gaan naar het wezen warmte dat niet in een definitie of in het woord ether te vangen is.

Sadi Carnot heeft de fundamentele uitgangspunten voor de huidige warmteleer gelegd. Hij ging uit van theoretische overwegingen en liet de praktijk op afstand. Zijn uitgangspunten waren:

1. een geïdealiseerde machine;
2. omkeerbare kringprocessen;
3. calorique.

Uit zijn theoretische overwegingen leidde hij de wet van de entropie af (tweede hoofdwet van de thermodynamica).

Ad 1: Vanuit het huidige bewustzijn lijkt het uitgangspunt van een geïdealiseerde machine niet meer dan een goede vondst, maar in die tijd was het een revolutionaire gedachte. Het griekse en middeleeuws-christelijke bewustzijn was nog doortrokken met de beleving dat de goden, engelen en elementenwezens deelnemen, wanneer er op aarde iets gebeurt. Alle verschijnselen op aarde hebben een kosmisch-planetaire samenhang. Een geïsoleerd, geïdealiseerd werktuig los van de kosmos was geen vanzelfsprekende gedachte, maar kon alleen door iemand bedacht worden die net als Descartes kon zeggen 'Ik denk dus ik ben.' Carnot: 'Alleen door het denken beleef ik mijn wezen, in de natuur zie ik dat niet meer.'

In de vroeg christelijke tijd en verder terug was het geen primitieve gedachte om de wereld geestelijk te beleven, ook was het geen illusie of mooipraterij van het zogenaamde primitieve bestaan, maar het was directe aanschouwing van het geestelijke in de mens en de natuur. De priesters en de leidende klasse gingen toentertijd hierin voor. Carnot had zo'n grote geestkracht dat hij in staat was een van de kosmos geïsoleerde machine te denken.

Ad 2: Ook het postuleren van omkeerbare processen is revolutionair, daar dit tegen iedere evolutiegedachte ingaat. Carnot veronderstelde een werking in zichzelf binnen de begrenzing van het systeem, die nu nog steeds gangbaar is in de warmteleer. Tegelijk is dit het probleem, daar open en niet omkeerbare systemen thermodynamisch moeilijk exact te beschrijven zijn.

Ad 3: Carnot heeft het etheridee in zijn veronderstelde 'calorique' verruimtelijkt. Deze warmtesubstantie zou onvernietigbaar altijd ruimtelijk aanwezig zijn. Dit staat lijnrecht tegenover de griekse visie van 'potentio'

en 'act', waarbij ontstaan en vergaan centraal staan. *Ontstaan is verschijning in de ruimte vanuit het onruimtelijk en vergaan is uit de ruimte verdwijnen.* De overgang en samenhang tussen het innerlijke en uiterlijke werd door de caloriquegedachte nog verder teruggedrongen, zo niet onmogelijk gemaakt. Uitgaande van de ideale, gesloten systemen kwam Carnot tot het inzicht dat er aan ieder warmteproces een *intrinsieke inefficiëntie* ten grondslag ligt.

Later is dit de entropie genoemd: alle geïsoleerde anorganische processen gaan weer op in de samenhang met de natuur. Alle processen zijn daarmee onomkeerbaar geworden. Carnot luidt de ontwikkeling in om ook de warmteleer in het 19de eeuwse materialisme een plaats te geven. Hij gaf de doodsteek aan de etherleer en verruimtelijkt de warmte. Later heeft R. Clausius de warmte vermaterialiseerd door deze als een gevolg van trillende atomaire materie te verklaren.

Samengevat:

- | | |
|--|---|
| - ideale machine: | isolement in de kosmos; |
| - omkeerbaar kringproces: | werking in zich, kosmos voor zichzelf; |
| - calorique: | het dynamische onruimtelijk/ruimtelijk effect verdwijnt; |
| - tweede hoofdwet (alle processen blijven ingebed in 'de natuur'): | een kosmos voor zichzelf is onmogelijk; hiermee is de mens als geestelijk monade verworpen. |

De tweede hoofdwet is later door Clausius en Kelvin als volgt verwoord: Clausius: Er is geen proces mogelijk met als enig resultaat dat iets dat koud is warm wordt. Kelvin: Het is onmogelijk warmte volledig te benutten tot arbeid, zonder dat er buiten dit proces nog veranderingen plaatsvinden. Kelvin noemde dit de 'dissipation of energy', de 'ontwaarding van energie': bij alle processen neemt de hoeveelheid omvormbare energie af.

Het denken in energie in plaats van in natuurkrachten werd door de avontuurlijke arts J.R. Mayer (1814-1878) in 1842 onder woorden gebracht, nadat hem was opgevallen dat het veneuze bloed van de Afrikaan veel roder was dan dat van de westerling. Het bracht hem op de gedachte dat door stofwisseling warmte ontstaat, die nodig is om te werken en het lichaam warm te houden. In warme landen is dit minder hard nodig, waardoor het zuurstofrijker blijft. Mayer sprak eerst nog over de metamorfose van krachten, maar later over de wet van behoud en energie. Door de zogenaamde wetenschappelijke autoriteiten werd hij echter volledig genegeerd, zoals wel meer gebeurde, bijvoorbeeld met Ohm, wiens ontdekking (wet van Ohm) door de Berlijnse filosofische faculteit

als onwetenschappelijk werd afgewezen. Mayer, die ook een tijdje in een krankzinnigeninstituut in een dwangbuis heeft vastgezeten, overzag de grootsheid van zijn idee: dat er nu één wet was waar alles in de wereld aan voldeed. Voor de geleerden was deze gedachte een paranoïde systeem en zij verklaarden dat Mayer door grootheidswaanzin gegrepen was. Op het eind van zijn leven, na vele verhandelingen en artikelen geschreven te hebben, werd Mayer erkend en mocht hij op de historische verzamelplaats van duitse natuurwetenschappers in 1869 een voordracht houden.

*Hij koos als thema 'Over de noodzakelijke consequenties en inconsequenties van de mechanica der warmte.' Tegen het einde van zijn rede werd het onrustig in de rijen der toehoorders. Wat was er gebeurd? Robert Mayer, de eeuwige buitenstaander tegen wil en dank, was begonnen de grenzen tussen natuurwetenschap en metaphysica te trekken. De man, die de zwaarste schokken in zijn leven door de kracht van zijn kinderlijk geloof was te boven gekomen, moest voor deze ongelovigen getuigenis afleggen: 'Gaan wij nu uit het gebied der levenloze natuur over naar de levende wereld. Terwijl ginds de noodzakelijkheid heerst en het steeds juist wijzende uurwerk van de wet, komen wij nu in een rijk van doelmatigheid en schoonheid... De grensscheiding wordt aangegeven door het getal. In de physica is het getal alles, in de physiologie is het weinig, in de metaphysica is het niets.' Mayer legt er de nadruk op, dat de verrichtingen van de geest nooit als identiek mogen worden beschouwd met mogelijk parallel lopende veranderingen in de hersenen, evenmin als een telegrafisch bericht met het gelijktijdige elektrochemische proces. Het was het jaar 1869. Het darwinisme was ten troon verheven. Onder het gehoor zat de physioloog Carl Vogt uit Genève, de meest radicale vertegenwoordiger van het natuurwetenschappelijk materialisme, die ooit heeft bestaan. Zijn 'Kolenbrandersgeloof en wetenschap', Moleschott's 'Kringloop van het leven', Ludwig Büchner's 'Kracht en stof' gaven in hun banaliteit het niveau der beschaafde massa aan. Robert Mayer, die in 1869 God naast het getal durfde plaatsen, was een ketter, evenals zijn zwabische landsman Keppler, die tweehonderdvijftig jaar tevoren het getal naast God plaatste.**

J.P. Joule (1818-1889) bevestigde de equivalentie tussen warmte en arbeid en benadrukte de wet van behoud van energie als een unificerend principe. Bekeken vanuit de natuurkwaliteiten is het energie-denken niet unificerend maar egaliserend. De wet van behoud van energie is eigenlijk

* Uit *Baanbrekers der wetenschap* van M. Gumpert.

een wet die weergeeft dat er constante getalsverhoudingen ten aanzien van de kwantiteit optreden, wanneer er een metamorfose van krachten plaatsvindt, dus in wat gangbaar het omzetten van energie wordt genoemd.

De ontwikkelingen in de 19de eeuw voeren steeds naar abstracte voorstellingsbeelden die los komen van de volle waarneming. De waarnemingen worden gereduceerd tot kwantiteiten en het denken isoleert zich door uitsluitend mechanische relaties als wetenschappelijk te accepteren. Zo is energie ook een belevingsloos *voorstellings-begrip*. Een bepaalde hoeveelheid energie zegt weinig tot niets over het proces en de omvang van het proces dat plaats moet vinden. Het begrip vermogen is in veel sterkere mate een *belevings-begrip*. Het geeft de intensiteit van het proces weer. Vermogen kan niet gedacht worden zonder kwaliteit en zonder een momentaan dynamisch tijdsproces. Energie kan men abstraheren van het proces en als ruimtelijk beeld van mogelijke processen voorstellen. Een stuwmeer vertegenwoordigt energie maar er gebeurt niets, dit in tegenstelling tot vermogen dat altijd processueel en dynamisch is. In de warmteleer is nu juist dit belevingsloze energiebegrip centraal komen te staan (eerste hoofdwet thermodynamica).

Clausius en Boltzmann hebben het warmtebegrip gekoppeld aan de atomaire en moleculaire hypothesen (de kinetische gastheorie). Beiden hebben de ideale warmtewetten wiskundig geformuleerd.

algemene gaswet: relatie met het atomaire denken:

$$\frac{P.V}{T} = n.R.$$

$$R = K.N_A$$

n = aantal mol

K = constante van Boltzmann $1.38.10^{23}$ J/K

R = universele gas-
constante =

N_A = getal van Avogadro = $6,022.10^{23}$ /mol

8,314 J/K mol

Het grafscript van Ludwig Boltzmann $S = K.\ln W$ geeft de relatie weer tussen de entropie (S) en de mate waarin een deeltjessysteem in chaos (W) verkeert. Door toename van de temperatuur neemt de chaos toe. Daalt de temperatuur tot -273°C (het absolute nulpunt volgens de Kelvin- en Celsiusschaal), dan verstart het deeltjessysteem en wordt de entropie nul. Boltzmann heeft zijn leven zelf beëindigd. De abstracte geestloze wereld van deeltjes speelde bewust en onbewust een belangrijke rol in zijn diep-depressieve laatste levensjaren.

Tenslotte een beknopte beschouwing van de thermodynamische hoofdwetten.

Eerste hoofdwet: $\Delta E = Q + W$

In woorden: de energieverandering ΔE komt overeen met de toegevoerde warmte Q plus de uitgeoefende arbeid W op het gas.

Bijvoorbeeld: Een gas stijgt in temperatuur (ΔE) wanneer het gas verwarmd wordt (Q) of wanneer het gas samengeperst wordt (W).

Tweede hoofdwet: $\Delta S = \frac{\Delta Q}{T}$

De technische bruikbaarheid van een gas wordt uitgedrukt in de entropie (S). Dit is de verhouding tussen de hoeveelheid vrijgekomen of toegevoegde warmte ten opzichte van de eigen absolute temperatuur (T). Zo is de entropie van een hoeveelheid warmte laag wanneer de temperatuur hoog is. Lage entropie - hoge mate van bruikbaarheid; hoge entropie - lage mate van bruikbaarheid. Naar de huidige opvattingen kan de entropie van de aarde en de kosmos als totaliteit alleen maar toenemen. De entropie van een hoeveelheid gas kan wel afnemen door verandering maar entropie kan niet vergaan. Bijvoorbeeld: Bij het ontsteken van een lucifer is er relatief veel warmte in een klein volume bij hoge temperatuur. De warmte zal zich verbreiden naar de omgeving, de warmteaccumulatie in het kleine volume neemt af, evenals de temperatuur. Het verhoudingsgetal dQ/dT (de entropie) zal toenemen. Wanneer de entropie toeneemt, neemt het volume waarin het proces plaatsvindt ook toe. De bruikbaarheid van het proces neemt af, omdat het rendement van een warmteproces bepaald wordt door het quotiënt van de begin- en eindtemperatuur:

$$\eta = \frac{T_{\text{begin}} - T_{\text{eind}}}{T_{\text{begin}}} = 1 - \frac{T_{\text{eind}}}{T_{\text{begin}}}$$

Voor een warmtemachine, automotor, koelkast of stoomketel is naast de warmte een koude plaats nodig om het proces mogelijk te maken. Een hoge *en* een lagere temperatuur zijn de voorwaarden voor een warmteproces. Naast de algemene gaswet en de eerste en tweede hoofdwet zijn aan het begin van de 20ste eeuw nog een derde en nulde wet geformuleerd.

Nulde hoofdwet: Evenwichtspostulaat

Worden twee volumes van verschillende temperaturen met elkaar in contact gebracht, dan treedt er warmtewisselwerking op totdat er even-

wicht is. De nulde hoofdwet drukt het oerfenomeen van de warmte uit. Een warmteproces vindt plaats tussen een hogere en een lagere temperatuur en het is altijd een *vereffeningsproces*.

Derde hoofdwet

Deze wet kent meerdere formuleringen. Bijvoorbeeld: Een stof kan niet in een eindig aantal stappen tot nul Kelvin afgekoeld worden. Oftewel het absolute nulpunt ($-273,15^{\circ}\text{C}$) is nooit te bereiken. Deze wet hangt heel nauw samen met de gekozen temperatuurschaal. De Celsius/Kelvinschaal in een lineaire rekenkundige schaalverdeling, waarbij door Celsius twee fixeerpunten afgesproken zijn die de getallen 0 en 100 markeren. Dalton heeft in 1818 nog een ander ordeningsprincipe voorgesteld dat echter niet opgenomen is. Dalton stelde voor om een constante relatieve volumeverandering als maat voor de temperatuur te nemen. Dit leidde tot zijn meetkundige logaritmische schaal. Ter toelichting het volgende:

Stel een gas in een cilinder met beweegbare zuiger heeft een volume V_0 . Wordt het volume $1,0179 \times$ groter, dan komt dit overeen met tien Daltongraad eenheden. Wordt het volume drie maal deze waarde groter ($1,0179^3$), dan noemt men dit 30 Daltongraad-eenheden. Wordt het volume twee maal deze waarde kleiner, dan betekent dit -20 Daltongraad eenheden. Dalton liet de waarden 32 en 212 Daltongraden samenvallen met 0° en 100° Fahrenheitschaal.

De Kelvin/Celsiuschaal voert door de lineaire inkrimping van een gas ($1/273$ per graad) bij -273°C tot een nulvolume en nuldruk. Het gekozen ordeningsprincipe voert zo tot een absoluut nulpunt. Het ordeningsprincipe van Dalton voert niet tot een nulpunt, omdat een oneindig aantal keren het volume met de factor 1,0179 verkleind kan worden. De Dalton temperatuur zal tot -10.000 en verder kunnen dalen zonder een absolute eindwaarde te bereiken. Dit ligt meer in de lijn van de derde hoofdwet. Praktisch verloopt een afkoelingsproces ook zo, dat er steeds meer moeite (energie) nodig is om dezelfde temperatuurdaling in Kelvin-eenheden te bereiken. In Dalton-eenheden zou dit constant zijn.

De temperatuurschaal moet gezien worden als een *afspraak* en niet als een concrete werkelijkheid die met de natuurkracht warmte samenvalt. Een nadere beschouwing zou nodig zijn om te bepalen welke temperatuurschaal het meest geëigend is om het warmtewezen tot uitdrukking te brengen.

Hoofdstuk 5

ELEKTRICITEITSLEER

5.1 Inleiding

De warmteleer, die in hoofdstuk 4 beschreven werd, en de elektriciteitsleer, die in dit hoofdstuk wordt behandeld, vormen samen de inhoud van de negende klas periode. De wijze van behandeling van deze twee onderwerpen vertoont veel overeenkomsten. Daarom zal in dit hoofdstuk dezelfde indeling worden gevolgd als in hoofdstuk 4. Soms zal voor meer algemene toelichting terugverwezen worden naar hoofdstuk 4.

Het thema elektriciteit komt in het hele periodeleerplan verhoudingsgewijs vaak aan bod. In klas 6 tot en met 8 wordt het onderwerp stapsgewijze verkend naast andere thema's, waaronder warmte. In klas 9 wordt een laatste maal zowel warmte als elektriciteit behandeld, waarbij ook veel aandacht wordt geschonken aan de technische toepassing. Terwijl het thema warmte daarmee afgesloten wordt, komt de elektriciteit dan nogmaals aan de orde in klas 11. Het onderzoek naar het wezen van de elektriciteit staat dan op de voorgrond. Voor een uitgebreidere beschrijving wordt verwezen naar hoofdstuk 2 en paragraaf 3.4.

De negende klasser staat aan het begin van de puberteit. Het astrale lichaam wordt geboren (zie hoofdstuk 1). Het kind krijgt de beschikking over een geïndividualiseerd zieleleven en beleeft zich daarin als afgesloten van zijn omgeving en vooral van andere mensen. In de ziel zelf differentiëren zich denken, voelen en willen en worden zelfstandige zielekrachten. Waar vóór de geboorte van het astrale lichaam denken, voelen en willen nog werden beschermd, nog waren ingebed, en als gevolg daarvan nog een harmonische eenheid vormden, moet er met het verzelfstandigen van de verschillende zielekrachten gezocht worden naar een nieuwe eenheid. Vanaf dit moment kan de persoonlijkheidskern, het 'ik', deze taak op zich nemen en harmoniserend, afstemmend werken op het denken, voelen en willen. Voor de puber en adolescent is dit 'ik' nog wel beschermd en kan het binnen deze bedding tastend zijn krachten meten met de zielekrachten, waar het vooralsnog weinig vat op heeft. Het elektrische kringproces laat in beeld dit hierboven beschreven omslagpunt zien. Zoals in dit hoofdstuk zal worden aangetoond heeft de elektriciteit die in de gesloten kring vergaat de tendens te verijlen, op te lossen, hij volgt een periferiegerichte tendens. Daartegenover werkt het magnetisme dat rond de gesloten kring ontstaat verdichtend, puntgericht. Er treedt een differentiatie op. De warmte, die in de gesloten kring ontstaat houdt deze polaire tendensen

bijeen en werkt eenheid bevorderend. Deze kwestie zal in paragraaf 5.5 tweede voorbeeld nog nader worden uitgewerkt.

5.2 Periodeopzet

Zoals hierboven reeds werd aangegeven zal de behandeling van het thema elektriciteit langs dezelfde weg verlopen als bij de warmte. Uitgaande van de verschijnselen worden op zorgvuldige wijze begrippen gevormd. Omdat voor de mens niet direct waarneembaar is hoe elektriciteit zich manifesteert, daar de waarneming altijd indirect verloopt, is de uitdaging om in dit gebied denkend door te dringen des te groter. Maar het is dan ook wel van het grootste belang om te snelle abstractie te voorkomen. Dan zou men de leerlingen met stenen voor brood laten zitten. Dit gevaar is bij meisjes nog groter dan bij jongens, omdat zij vaak in het geheel geen toegang krijgen tot de wereld van de elektriciteit, wanneer zij zich niet voldoende kunnen inleven in de verschijnselen en de te vormen begrippen. Naast begripsvorming zal beeldvorming vaak een uitkomst kunnen bieden. Dit zal in paragraaf 5.4 nader worden uitgewerkt. Net als bij de warmte mondt de begripsvorming uit in enerzijds het rekenen, anderzijds de technische toepassing. Natuurlijk kan men ook hier de omgekeerde weg volgen en een stuk techniek als uitgangspunt nemen. Men vraagt naar de werking en zoekt naar de verschijnselen die aan de basis staan van bijvoorbeeld een transformator of luidspreker.

Er volgt nu een overzicht van mogelijk te behandelen deelthema's:

- statische elektriciteit: het ontstaan, bestaan en vergaan van het veld;
- het elektrische kringproces: de dynamische elektriciteit; spanning en magnetisch effect (stroom); de wet van Ohm; de draaispoelmeter;
- wisselspanning, geluid en het frequentiebegrip; de luidspreker;
- de telefoon;
- inductie en zelfinductie; de transformator; de elektriciteitscentrale.

5.3 De proeven

5.3.1 Inleiding

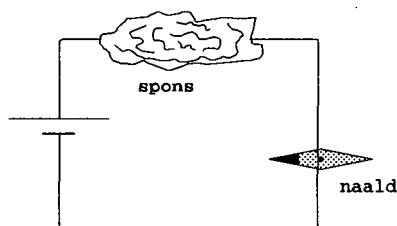
Gezien het belang van een stapsgewijze opbouw van de behandeling van elektrische verschijnselen om het gevaar van te snelle abstractie te vermijden is het zaak proeven zo op te zetten, dat oorzaak, voorwaarde en gevolg goed te onderscheiden zijn. Te zeer samengestelde proeven,

waar meer oorzaken en gevolgen door elkaar heen spelen, zijn niet geschikt. We maken weer een onderscheid tussen ervaringsreeksen en waarnemingsreeksen.

5.3.2 Uitgewerkt voorbeeld van een ervaringsreeks

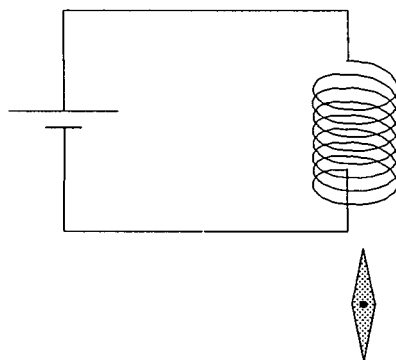
Warmte- en magnetisch effect bij de elektrische kring

1. Bevestig startkabels aan een accu en houdt de uiteinden zeer dicht bij elkaar. Er ontstaat geen vonk.
2. Houd de klemmen in beide handen. Er is niets te voelen.
3. Sla de klemmen tegen elkaar aan. Vonken spatten in het rond, zoals bij het slijpen van een beitel.
4. Maak met accu, kabels en een metalen spons een kring. De spons wordt roodgloeiend.
5. Houd een gevoelige kompasnaald bij de draad van situatie 4. De naald gaat loodrecht op de draad staan.



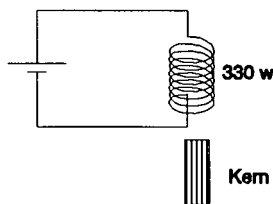
Figuur 80

6. Hetzelfde als onder 5 maar nu de plus- en min-pool gewisseld. De naald keert om.
7. Wikkel de kabel tot een spoel en maak een elektrische kring. De kompasnaald wordt krachtiger aangetrokken. In de spoel zal de naald in het verlengde van de spoel gaan staan.



Figuur 81

8. Plaats een stalen kern in de spoel, verder analoog aan 7. De naald wordt nog sterker aangetrokken.
9. Herhaal proef 7 met spoelen van 330, 660 en 1320 windingen. Meer windingen betekent dat de naald sterker wordt aangetrokken.
10. Herhaal proef 7 met spoelen van verschillende draaddikten en gelijk aantal windingen. Hoe dikker de draad, hoe sterker de naald wordt aangetrokken.
11. Maak een elektrische kring met accu, kabels en een spoel van bijvoorbeeld 330 windingen. Houd nu een stalen kern in de buurt van de opening van de spoel. De kern wordt naar binnen gezogen. (Wissel- of gelijkspanning speelt hier geen rol).



Figuur 82

De hierboven beschreven proevenreeks maakt zowel het warmte-effect als het magnetisch effect bij een elektrisch kringproces ervaarbaar. Daarbij nemen de onderdelen 7 t/m 11 al meer het karakter aan van een waarnemingsreeks, waarmee het magnetisch effect van een spoel nader bestudeerd kan worden.

5.3.3 Uitgewerkte voorbeelden van een waarnemingsreeks

Eerste voorbeeld van een waarnemingsreeks: statische elektriciteit

Voor het ontstaan van statische elektriciteit is wrijving nodig tussen:

- luchtlagen (bijvoorbeeld in de atmosfeer als een hogere luchtlaag sneller beweegt dan een lager gelegen luchtlaag);
- vloeistoflagen (bijvoorbeeld stromende olie in een pijp geeft concentrische stromingslagen; stroomt de olie in een tank dan vallen de lagen van elkaar en treedt er explosiegevaar op);
- vaste stoffen;
- stoffen met verschillende aggregatietoestanden.

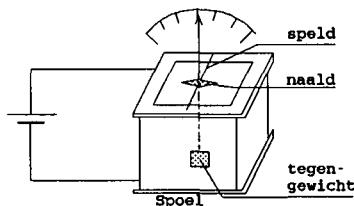
Naast bovengenoemde voorbeelden, waarover men iets kan vertellen, kunnen enige proefjes uit klas 8 herhaald worden:

1. Houd twee ongewreven pvc-buizen naast elkaar, waarbij men de bovenste uiteinden losjes tussen de vingers houdt. De buizen hangen verticaal naast elkaar.
2. Hetzelfde, maar nu met gewreven buizen. De buizen zullen uit elkaar gaan staan.
3. Wrijf twee plaatmaterialen tegen elkaar, bijvoorbeeld plexiglas en pvc (platen van $25 \times 10 \text{ cm}^2$). Houd de platen in de buurt van een elektroscop, die eerst met een gewreven pvc buis in een elektrische toestand is gebracht. De plexiglasplaat doet de uitslag van de elektroscop afnemen, terwijl het omgekeerde optreedt bij de pvc-plaat. Wil deze proef slagen, dan dient hij te worden uitgevoerd in een droge ruimte, met droog en liefst warm materiaal.
4. Bevestig een reeks dunne papier slierten (vliegerpapier, stroken van 2 mm breed en 20 cm lang) midden en bovenop de bol van een van de Graaff generator. Wordt de bol in een elektrische toestand gebracht dan zullen de slierten als een ragebol uit elkaar gaan staan. Men kan de slierten ook alzijdig over het boloppervlak verdelen. De slierten zullen dan radiaal ten opzichte van het boloppervlak gaan staan.

Tweede voorbeeld van een waarnemingsreeks: de draaispoelmeter

Deze waarnemingsreeks is bedoeld om het principe van een 'stroom'meter te demonstreren.

1. Een magnetometer of provisorische ampèremeter (een draaibare magneet op een spoel) wordt aangesloten op een batterij. De wijzer



Figuur 83

slaat uit. Worden de plus- en min-pool omgedraaid, dan slaat de wijzer naar de andere kant uit.

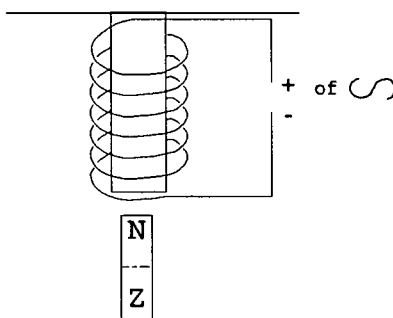
Men kan in dit verband wijzen op de rechterhandregel, een handige *afspraak* om de noordkant van een spoel te vinden. Leg je rechterhand om de spoel, zodanig dat de vingers langs de windingen liggen, wijzend van plus naar min. De opgestoken duim wijst dan richting noordkant.

2. Vervolgens kan men de werking van een gewone draaispoelmeter demonstreren, waarbij de spiraalveertjes de functie van het tegengewicht vervangen.

Derde voorbeeld van een waarnemingsreeks: de luidspreker

De volgende waarnemingsreeks maakt het principe van de luidspreker duidelijk.

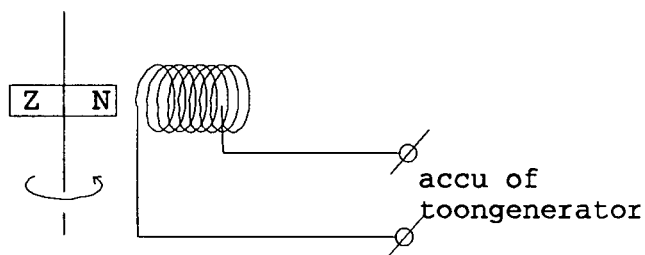
1. Maak een spoel op een toiletpapierrolletje met spoeldraad van circa 0,5 mm dik. De spoellengte wordt ongeveer 5 cm. Plak dit spoeltje midden op een stevig soort papier. Plaats een magneet in het spoeltje. Sluit eerst een batterij aan op het spoeltje. Het spoeltje zal nu naar boven of naar onderen bewegen.



Figuur 84

2. Sluit men nu een wisselspanning aan op het spoeltje (bijvoorbeeld van een elektrische voeding met een frequentie van 50 Hz), dan zal het papier gaan trillen. Een lage toon is hoorbaar.
3. Sluit nu een toongenerator aan op het spoeltje. Neem in de kring ook een lampje op om overbelasting - ook van eventuele zelfinductie van de spoel - te voorkomen. Laat de frequentie variëren tussen 0,1 en 15.000 Hz (ongeveer de gehoorrens). De proef kan nogmaals met een standaard luidspreker worden uitgevoerd.

- Aansluitend aan deze reeks kan men nog een andere toepassing van de spoel demonstreren, namelijk de elektromotor, als herhaling van de achtste klas lesstof. Een draaibare magneet wordt opgesteld. Naast de magneet bevindt zich een spoel, welke eerst op de accu of batterij wordt aangesloten. Door de plus- en min-pool steeds achtereenvolgens te verwisselen zal de magneet gaan draaien. Vervolgens kan men de spoel op een toongenerator aansluiten.

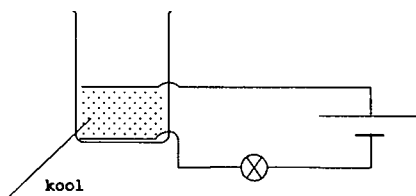


Figuur 85

Vierde voorbeeld van een waarnemingsreeks: de telefoon

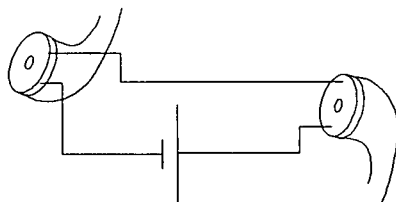
Deze waarnemingsreeks maakt de werking van de telefoon duidelijk.

- Soldeer aan twee metalen plaatjes geïsoleerd koperdraad. Maak een elektrische kring van een lampje, een gelijkspanningsbron van 12V en de twee metalen plaatjes. Doe het ene plaatje onderin een bekerglas, daarop een laagje koolstof in korrelvorm en plaats het tweede plaatje er boven op. Door (harder) op de plaatjes te drukken gaat het lampje (feller) branden.



Figuur 86

2. Dezelfde proef, maar nu met een koolstofmicrofoon (mondstuk van een telefoonhoorn). Drukt men op de conus, dan gaat het lampje feller branden.
3. Vervolgens maakt men een elektrische kring van een koolstofmicrofoon en een luidspreker (respectievelijk mond- en oorstuk van een telefoonhoorn) en een gelijkspanningsbron van 12V. De werking van een telefoon is altijd weer verrassend voor leerlingen. Er wordt haast geen materiaal gebruikt en toch hoor je zo nauwkeurig de stem.

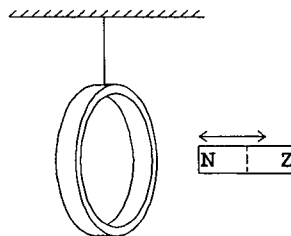


Figuur 87

Vijfde voorbeeld van een waarnemingsreeks: inductie en zelfinductie

Het idee inductie is bedacht door Michael Faraday (1791-1869). In paragraaf 5.9 wordt enige informatie over hem gegeven. Wat daar staat aangegeven kan worden opgenomen in een (biografische) vertelling. Hier volgt een waarnemingsreeks rond inductie.

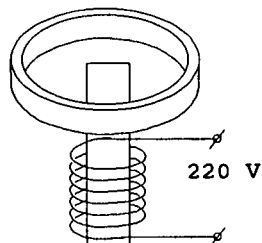
1. Maak een elektrische kring met een spoel van circa 1000 windingen en een mA-meter (bijvoorbeeld een demonstratie draaispoelmeter). Beweeg een magneet boven en in de spoel. Zolang de magneet beweegt slaat de meter uit. Vergeleken bij het naar de spoel bewegen, zal bij het van de spoel af bewegen een tegengestelde meteruitslag ontstaan. Wat er ook wordt omgepoold: de magneet, de spoel of de meteraansluiting, steeds zal de meteruitslag omdraaien.
2. De ring van Thomson. Beweegt men een magneet naar een gesloten, vrij hangende ring (niet van ijzer of nikkel), dan wordt deze weggeduwd. Trekt men de magneet



Figuur 88

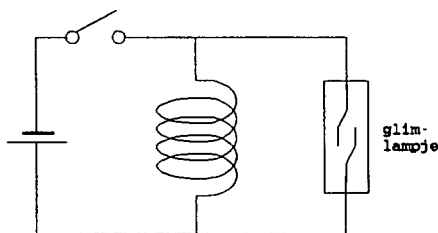
weg, dan wordt de ring meegenomen. Met twee magneten naast elkaar wordt het effect sterker of zwakker, naar gelang de magneten parallel of contraparaal worden gehouden.

3. Het afstotende effect kan nog versterkt worden door de ring over de kern van een spoel te leggen en er even 220 V op aan te sluiten. De ring vliegt omhoog, een doorgezaagde ring blijft echter liggen. In plaats van een ring kan er ook een hele spoel opgezet worden, die gaat zweven, wanneer de kring van de tweede spoel middels een kort snoertje wordt kortgesloten (primaire spoel 300 à 600 windingen).



Figuur 89

4. Hoe sneller een magneetveld in de buurt van een spoel of in de spoel komt, hoe hoger de inductiespanning is. Dit kan prachtig gedemonstreerd worden met zelfinductie: Op een accu wordt een spoel aangesloten met circa 10.000 windingen. Sluit de schakelaar, de spoel wordt magnetisch. Opent men nu de schakelaar snel, dan flitst het glimlampje even op en wel aan de plus-kant van de accu.



Figuur 90

Het vermogen van een spoel om een inductiespanning op te wekken noemt men de zelfinductie van een spoel. Deze zelfinductie is des te groter naarmate de spoel compacter is en er meer ijzer in verwerkt zit.

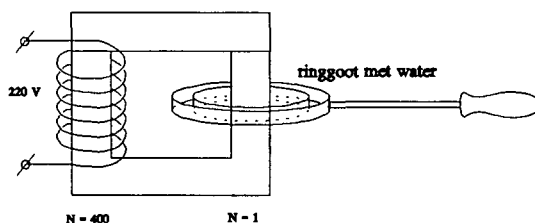
5. Tenslotte kan men het transformatorprincipe demonstreren. Plaats op een U-kern twee spoelen van bijvoorbeeld 440 en 24 windingen. Sluit de kern met een juk. Sluit een wisselspanningsbron van 220V en 50 Hz aan op de spoel van 440 windingen en een lamp van 12V en 3W

op de spoel met 24 windingen. De lamp zal op normale sterkte branden. Met een wisselspanningsmeter kan de spanning secundair gemeten worden: circa 12V. Vervolgens meet men de stroom primair en secundair (14 en 250 mA).

6. Een toepassing van het omlaag transformeren vormen de volgende proefopstellingen:

a. Inductieverwarming:

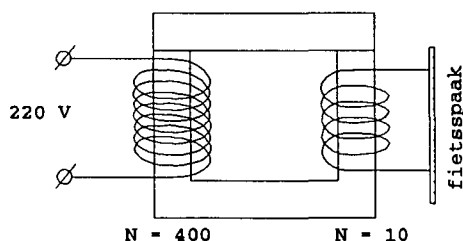
Sluit 220V wisselspanning aan op een spoel met 400W, die middels een U-kern en juk verbonden is met een spoel van één winding in de vorm van een ring met gootje, waarin een weinig water is gedaan. Het water in de ring gaat onder invloed van de secundair ontwikkelde warmte vrij snel koken.



Figuur 91

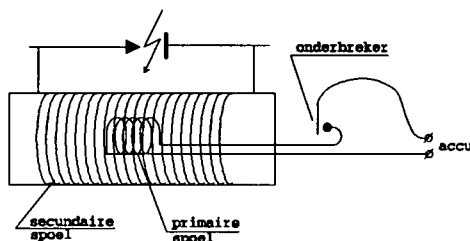
b. Lasapparaat:

Sluit in een overeenkomstige opstelling een secundaire spoel aan met 10 windingen. De windingen moeten heel dik zijn, omdat de secundaire kring met behulp van een ijzerdraad wordt kortgesloten. De ijzerdraad wordt roodgloeiend en brandt door. Een spaak van een fiets geeft een extra mooi effect vanwege de coating die er op aangebracht is.



Figuur 92

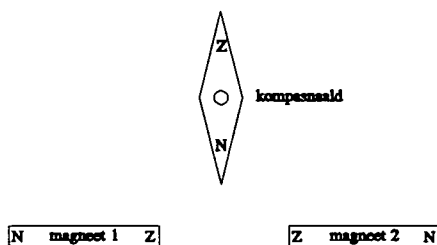
7. Een toepassing van het omhoog transformeren vormt de Ruhmkorff inductor. Een primaire spoel met een gering aantal windingen wordt geplaatst in een secundaire spoel met een groot aantal windingen. De primaire kring wordt aangesloten op een accu. Een magnetische onderbreker verbreekt ritmisch de primaire kring, waardoor er secundair zeer hoge spanningen ontstaan, doordat de zelfinductiespanning van de primaire spoel sterk omhoog wordt getransformeerd.



Figuur 93

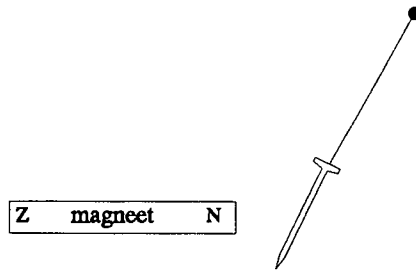
5.3.4 Een rouleerpracticum elektriciteit/magnetisme

1. Beklop een stalen strip (veerkrachtige verpakingsstrip voor pallets) met een hamer in N-Z richting. Controleer aan een kompas hoe krachtig de strip magnetisch is geworden.
Beklop een strip in één andere richting, wat bemerk je?
Beklop de strip nu in wisselende richtingen, wat bemerk je nu?
2. Het vergelijken van de sterkte van magneten.
Neem in iedere hand één magneet en beweeg deze naar een kompasnaald toe (houd de magneten op gelijke afstand tot het kompas). Beweegt de naald naar rechts, dan is de rechtermagneet het sterkst.



Figuur 94

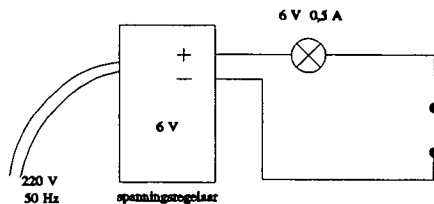
3. Hang een spijker of metalen stripje op aan een koperdraad. Zie figuur. Verwarm de spijker of strip met een brander tot ongeveer roodheet. Wat gebeurt er? Bij welke hittekleur zal de spijker weer in de greep van de magneet komen?



Figuur 95

4. Hoe makkelijk of moeilijk ontstaat een gesloten kringproces? Maak de volgende opstelling en neem achtereenvolgens de volgende voorwerpen op:

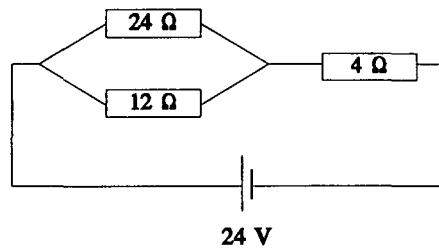
- ijzerdraad/spijker (kort, lang, dik, dun)
- koolstof
- hout
- vochtige doek
- bakje water met zout, zuur of suiker
- dunne ijzerdraad, met brander te verwarmen
- weerstandsdraad (constantaan)
- extra lampjes.



Figuur 96

5. Stroom is magnetisme. Bekijk met behulp van een galvanoscoop de stroomverschillen bij verschillende lampjes:
- 6 V, 0,05 A
 - 6 V, 0,5 A
 - 12 V, 0,5 A
6. Meet met behulp van een ampèremeter de stroom bij de verschillende lampjes.
7. Meet de stroom wanneer bij 6V twee dezelfde lampjes in serie of parallel geschakeld worden.

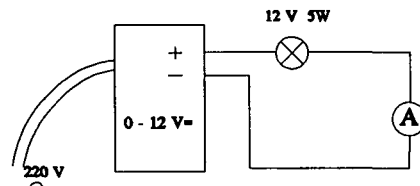
8. Gegeven een kring met drie weerstanden. Bereken de stroomsterkte en de spanning over iedere weerstand.



Figuur 97

9. Maak een batterij na. Neem een zinkplaatje en een koolstof staaf en plaats die in aangezuurd of gezout water. Meet de stroom met een ampèremeter of galvanoscoop. Idem met twee loodplaten, maar activeer deze batterij eerst door hem aan te sluiten op 5 V (zeven minuten).

10. Meet de stroom bij verschillende spanningen.
Opstelling: Gesloten kring met een lamp van 12V en 5W en regelbare spanning. Maak een tabel V , I , $V/I = R$ en bereken R .

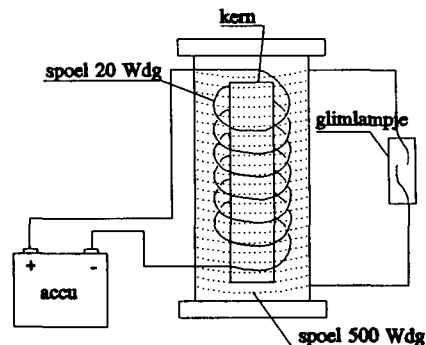


Figuur 98

11. Inductie.

Maak een gesloten kring met een ampèremeter en een spoel van minstens 400 windingen. Beweeg een magneet in de spoel heen en weer en teken aan wanneer de wijzer naar rechts of links uitslaat.

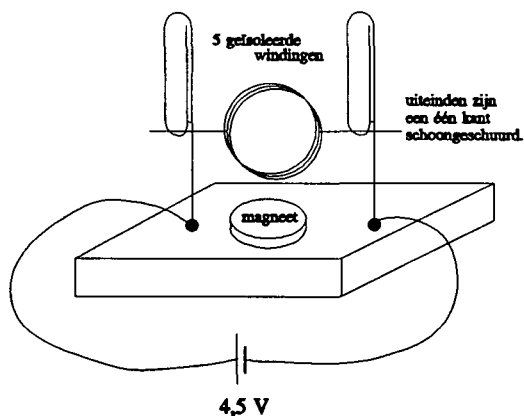
12. Leg een zelfgewikkelde spoel ($N=20$; de koperdraaddiameter 2 mm; met stalen kern) in een spoel met ongeveer 5000 windingen. Sluit op de spoel van 5000 windingen een glimlampje aan. Sluit de spoel met 20 windingen kortstondig aan (aantikken) op de accu. Het glimlampje flitst op aan de min-kant.



Figuur 99

12. Maak een elektrische bel (bouwdoos-elektriciteit).

13. Maak een dynamo: de paperclipmotor.



Figuur 100

Het spoeltje is gemaakt van gelakt koperdraad. De diameter komt overeen met de magneetdiameter. Het aantal windingen bedraagt 5 à 10. De ene contactdraad helemaal schoon schuren, het andere uiteinde maar voor de helft in verband met aantrekking of afstoting.

De motor kan ook als dynamo gebruikt worden. Sluit dan de uiteinden aan op een gevoelige ampèremeter. Om het effect te versterken kan men boven de spoel ook een magneet houden. Er ontstaat dan een homogeen magnetisch veld.

5.4 Beeldvorming

Zoals reeds in paragraaf 5.2 naar voren werd gebracht kan beeldvorming, in de zin van het vergelijken van verwante fenomenen, voor leerlingen in de negende klas een belangrijke aanvulling zijn op de meer abstracte benadering van het ontwikkelen van en het werken met begrippen. Elektrische verschijnselen zijn niet gemakkelijk toegankelijk, omdat de waarneming van de fenomenen veelal indirect is en het denken dus extra moet worden aangesproken. Daarbij komt dat sommige leerlingen onbewust antipathiegevoelens hebben ten aanzien van elektrische verschijnselen. Juist dan kan het beeldend vergelijken ineens wel een toegang bieden. Er zullen een tweetal voorbeelden worden behandeld.

Eerste voorbeeld van beeldvorming: het sluiten van een kring vergeleken met het ontwaken

In een batterij of accu leeft de wil om chemisch actief te worden en daarmee elektriciteit te laten ontstaan. Deze wil kan slechts gerealiseerd worden als de polen via een kring gesloten worden. Zie paragraaf 5.3.2 (blz. 180 en 181) voor de verschillende proeven. Wordt de kring eenmaal gesloten, dan is er gelijktijdig een ontstaans- en vergaansproces van elektriciteit. De kring maakt het ontstaan mogelijk, terwijl het vergaan in de hele kring plaatsvindt, niet slechts in een gedeelte ervan. Verder 'stroomt' de elektriciteit niet door de kring - er zijn geen fenomenen die in deze richting wijzen - maar er is een procesmatige toestand van elektriciteit die door chemische activiteit ontstaat en weer vergaat in de kring, waarbij warmte en magnetisme ontstaan. Hoe kan nu de kring het ontstaan - en weer vergaan - mogelijk maken, terwijl toch de accu of batterij de actieve ontstaansruimte is? Een vergelijking met het ontwaken van de mens werpt hier licht op. Zolang een mens wakker is vinden er bepaalde lichaamsprocessen plaats, die gedurende het slapen niet optreden. Zodra een mens ontwaakt verbindt het bewustzijn zich met de ruimte. De lichaamsprocessen die dan op gaan treden veroorzaken niet het bewustzijn, het is eerder omgekeerd: het bewustzijn brengt de lichaamsprocessen voort, maar deze processen maken het verbinden van het bewustzijn met de ruimte wel mogelijk. Het sluiten van een elektrische kring is te vergelijken met het ontwaken uit de slaap. Het lichaam en de kring zijn aangrijpingspunten voor ruimtewerkingen. Zoals het bewustzijn houvast heeft aan het lichaam, heeft het proces van ontstaan en vergaan van de elektriciteit houvast aan de kring.

Met deze beschrijving heeft men de mogelijkheid het verband tussen het onruimtelijke en het ruimtelijke duidelijk te maken, zoals dit ook het geval was met het voorbeeld van zelfontbranding (zie paragraaf 4.4, blz. 83). Hopelijk is hiermee ook duidelijk dat het watermodel in alle opzichten een gebrekkige analogie is. Het bindt het bewustzijn eenzijdig aan de waarnemingswereld, terwijl het juist de opgave van de fenomenologie is om door te dringen tot de idee.

Tweede voorbeeld van de beeldvorming: de wet van Ohm

De spanning en de stroom, het magnetische, staan in een vaste relatie tot elkaar die tot uitdrukking komt in de wet van Ohm. De wet van Ohm kan als een algemene psychologische wetmatigheid geïntroduceerd

worden: het resultaat van een actie hangt af van de wil en van de medewerking (1) of tegenwerking (2) vanuit de omgeving:

(1) het effect of de intensiteit van een proces = wil of wens x medewerking, geleidbaarheid of bereidheid van de omgeving

(2) het effect = $\frac{\text{wil, wens, verlangen}}{\text{tegenwerking, weerstand}}$

Aan een aantal voorbeelden kan dit duidelijk gemaakt worden: een huis willen bouwen, huiswerk maken en dergelijke. Ook de kortstondige grote wil (verlangen) kan hier worden aangehaald en kan vergeleken worden met de elektriseermachine.

In de elektriciteitsleer wordt meestal de tweede schrijfwijze met de weerstand in Ohm gekozen, terwijl schrijfwijze (1) gebruik maakt van het begrip geleidbaarheid dat uitgedrukt wordt in Siemens.

het magnetisch effect = $\frac{\text{de elektrische spanning}}{\text{weerstand}}$

$$I \text{ (Ampère)} = \frac{U \text{ (Volt)}}{R \text{ (Ohm)}}$$

Het is ook mogelijk om aan de hand van metingen te constateren dat de verhouding tussen stroom (magnetisme) en spanning constant is.

$$\frac{I}{U} = \text{constant of } \frac{U}{I} = \text{constant}$$

Deze constante waarde zegt iets over de *kring*. Lengte, dikte en materiaal bepalen deze waarde ($R = \rho \cdot l/d$).

5.5 Begripsvorming en ideeënvorming

Voor de leerkracht is het belangrijk om een visie te hebben op:

1. de plaats van elektriciteit en magnetisme in het spectrum van de natuurkrachten;
2. oertendens, gestiek of gebaar van de elektrisch/magnetische fenomenen.

Hierover zullen enige karakteristieke ideeën ontwikkeld worden. Sommige van de nu volgende beschouwingen zijn moeilijk voor negende klas leerlingen. De lezer beoordele zelf wat hij/zij geschikt acht.

Op de vraag 'wat is elektriciteit?' zou men als volgt antwoord moeten geven: elektriciteit is een begrip, een wezen dat denkend doorgrond kan worden. Een begrip krijgt echter pas inhoud door het in zijn verschijning te leren kennen. Daarom wordt geen model of definitie gegeven maar ontstaat het houvast in de fenomenen door een rationele beschrijving van die fenomenen.

In deze paragraaf zullen ten aanzien van de volgende voorbeelden begripsvorming en ideeënvorming worden behandeld:

1. het ontstaan, bestaan en vergaan van elektriciteit;
2. het elektrisch kringproces en de dynamische elektriciteit;
3. inductie.

Eerste voorbeeld van begrips- en ideeënvorming: het ontstaan, bestaan en vergaan van elektriciteit

Ontstaan en vergaan van elektriciteit kan niet bij voorbaat - dus zonder kennisproces - betekenen dat alleen het wel of niet bemerkbaar zijn verandert. Meestal wordt in de natuurkunde alleen met veranderingsprocessen en omzetting gerekend. Ontstaan en vergaan zou echter ook kunnen betekenen, dat het verschijnsel elektriciteit werkelijk in de ruimte komt, respectievelijk uit de ruimte verdwijnt. Dat de elektriciteit dus in zijn verschijning ontstaat en vergaat. Er is niets in de elektrische fenomenen dat erop wijst dat het aanwezig blijft, als het niet meer aantoonbaar is. De behoefte de verschijnselen wel zo te interpreteren ontstaat, zodra men elektriciteit materialistisch wil opvatten. Het denken in termen van elektrische deeltjes ligt dan voor de hand. Gaat men direct uit van de fenomenen, dan wijzen deze erop dat zodra een elektrisch veld verdwijnt de elektriciteit ook werkelijk uit de ruimte verdwenen is. Wie een normale natuurkundige opleiding heeft gevolgd is sterk behept met het deeltjesdenken. Wil men in de hier volgende uiteenzettingen mee kunnen, dan moet men dit deeltjesmodel met kracht terughouden. Deze opmerkingen gelden overigens niet voor de negende klas leerlingen, immers op de Vrije School zullen zij met zulke denkmodellen nog nauwelijks kennismake hebben. Dat gebeurt normaal gesproken pas in de 11de klas.

In deze periode kunnen drie processen worden behandeld waardoor elektriciteit ontstaat, namelijk:

- wrijving (van de Graaffgenerator, wrijven van platen, zie paragraaf 5.3.3 eerste waarnemingsreeks (blz. 181);
- chemische processen (accu, batterij, dit wordt in de tweede waarnemingsreeks behandeld, zie blz. 182);
- magnetisme/inductie (dynamo, dit komt in de derde waarnemingsreeks aan de orde, zie blz. 183).

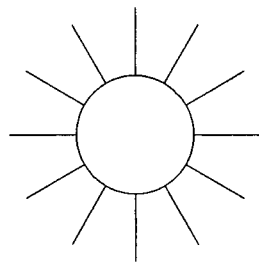
Men heeft ook nog de mogelijkheid het thermokoppel te behandelen, omdat dit immers te maken heeft met beide hoofdthema's van de negende klas periode: warmte en elektriciteit.

In de meeste gevallen ontstaat gelijkspanning, alleen bij de dynamo treedt er wisselspanning op. Een ander onderscheid dat kan worden gemaakt is de tegenstelling statische en dynamische elektriciteit. De statische elektriciteit toont zich in het elektrische veld, dat zich in de ruimte een tijdje kan handhaven, in tegenstelling tot de dynamische elektriciteit die tot verschijning komt in een proces. De fenomenen van de dynamische elektriciteit zijn momentaan, staan als het ware met maar één voet in de ruimte. Het elektrische veld daarentegen is duidelijk een ruimt fenomeen. Het veld kan gefixeerd worden aan geïsoleerde voorwerpen, zoals kunststofplaten of condensatoren. We zullen de fenomenen van de statische elektriciteit nu nader bekijken vanuit de blikrichtingen ontstaan, bestaan en vergaan. De bijbehorende proeven staan beschreven in de eerste waarnemingsreeks van paragraaf 5.3.3 (blz. 181).

Bij wrijving tussen gassen, vloeistoffen en vaste stoffen *ontstaat* altijd statische elektriciteit. Beperken we ons tot het wrijven van vaste stoffen, zoals het wrijven van twee kunststof platen, dan wordt het harde, gladde materiaal positief elektrisch en het zachte, ruwe materiaal negatief elektrisch. Bijvoorbeeld plexiglas en pvc-plaat: de eerste wordt positief, de tweede negatief elektrisch. Bij het wrijven van glas en hars (barnsteen) wordt de eerste positief en de tweede negatief elektrisch. Het veld, de ruimtestructuur, komt pas te voorschijn wanneer de twee platen of stoffen uit elkaar getrokken worden.

Het *bestaan* van de statistische elektriciteit. Hoe is een veld in de ruimte aanwezig, wat is zijn structuur, wat wil het bewerkstelligen? We kunnen twee gewreven platen zo ver uit elkaar trekken, dat zij beide een zelfstandig veld om zich heen hebben. Het ene noemen we een negatief en het andere een positief veld. De structuur van deze velden wordt weergegeven door de traditionele veldlijnen. Een nieuwe vraag is: wat wil dit veld, waar streeft het naar, wat is zijn tendens? Een elektrisch veld streeft er naar om te verdwijnen, om te *vergaan*. Dit vergaan kan op verschillende manieren plaatsvinden:

1. Door versplintering in de ruimte. Papieren snippertjes worden door het veld aangezogen en weer afgestoten. De snippertjes worden zelf elektrisch, terwijl het veld aan kracht inboet.
2. Het veld kan in de aarde verdwijnen.
3. Door een vonk aan een tegengesteld veld vergaat het veld. Bij een elektriseermachine is dit goed te observeren: hoe langer men draait, hoe sterker de tegengestelde velden en hoe eerder de vonk overslaat.
4. Het veld heeft ook de tendens te verdwijnen in het grensvlak (zie voor dit begrip uit de projectieve meetkunde paragraaf 4.9.5, blz. 156 e.v.). Een ragebol van dunne slierten papier laat deze tendens tot verijling, oplossing of verdwijnen in de ruimte prachtig zien.

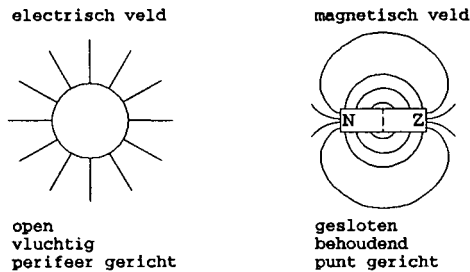


Figuur 101

Deze kwestie wordt nog duidelijker als men een elektrisch veld vergelijkt met een magnetisch veld, dat een polaire tendens vertoont.

Het magnetische veld (ferro-magnetisme) is zeer selectief, alleen ijzer, nikkel en kobalt worden aangetrokken en vastgehouden. Het magnetische veld is daarbij een in zichzelf gesloten veld, een zogenaamd wervel-veld. Het heeft ook de tendens zich in het materiaal te verstoppen. Hieraan komt men tegemoet wanneer twee magneten bewaard worden, namelijk twee aan twee, contraparaallel, verbonden met ijzeren afdekklaatjes. Het elektrische veld wil vervluchtigen, verdwijnen, is perifeer-gericht. Het magnetische veld is verdichtend, behoudend (wil in de ruimte blijven) en punt-gericht.

Typerend in dit verband is ook dat de veldlijnen bij het elektrische veld loodrecht op de elektroden staan, terwijl de veldlijnen rond een magneet deels zeer schuin op het magneetoppervlak staan. Bij het elektrische veld wordt daarin de tendens zichtbaar om zo snel mogelijk van de stof weg te willen en te verdwijnen, terwijl bij het magnetische veld een afrondend, gesloten gebaar zichtbaar wordt. Daarbij dient in beide gevallen de tendens goed onderscheiden te worden van de veldstructuur. Het elektrische *veld* is het werkingsgebied van een elektrisch voorwerp. Het is een begrip dat zeer nauw verbonden is aan de waarneming. De *veldstructuur* geven we aan met veldlijnen. Om tot dit begrip te komen is al een grotere denkactiviteit nodig. Om tenslotte de *tendens* van het veld, het gebaar dat erin verborgen ligt, te onderscheiden, vergt de grootste denkinspanning. Voor het elektrische en het magnetische veld kunnen de tegengestelde tendensen als volgt worden weergegeven:



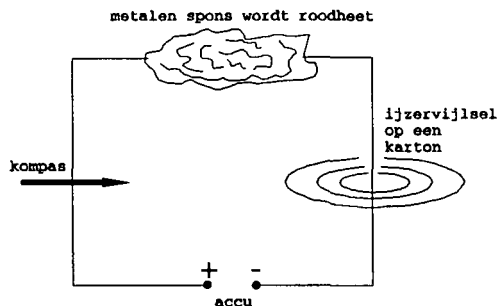
Figuur 102

Deze polaire tendensen zijn in vele proefjes zichtbaar en kunnen als een fenomenologisch inzicht getypeerd worden.

Tweede voorbeeld van begrips- en ideeënvorming: het elektrische kringproces en de dynamische elektriciteit

De dynamische elektriciteit komt in verschijning wanneer ontstaan en vergaan samenvallen. Op geen enkele wijze kan dit proces gefixeerd worden, het is alleen actief in het moment. De batterij toont zijn wil om tot een proces te komen in de vorm van de spanning. De spanning is vergelijkbaar met de wens, het voornemen of de wil die men heeft om mogelijkwerijs iets te gaan doen. Pas in het doen wordt duidelijk waartoe deze batterij of zonnecel in staat is.

Het oerfenomeen van de dynamische elektriciteit is de gesloten (metalen) kring. Aan de hele kring inclusief de spanningsbron zijn twee polaire waarnemingen te doen, namelijk het ontstaan van *warmte* en het ontstaan van *magnetisme* (zie ervaringsreeks in paragraaf 5.3.2, blz. 180).



Figuur 103

Hoe korter en dikker de kring is, des te meer warmte en magnetisme in verschijning treden. Ook zullen de chemische processen in de accu intensiever worden. Het poolmateriaal dat het sterkst in oplossing gaat, aangetast wordt, noemt met de min-pool. In een kring die uit één draad bestaat gaat de warmteontwikkeling gelijk op met de sterkte van het magnetisme.

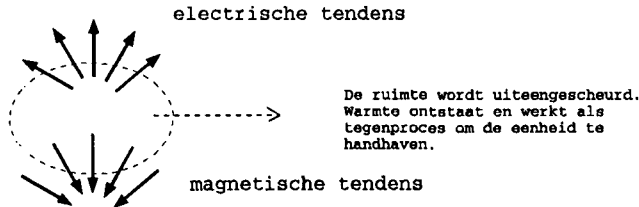
Voor de leerkracht is het heel belangrijk om bij deze basisfenomenen aan te sluiten. Vanuit het fenomeen is het onomstotelijk gegeven, dat magnetisme het primaire fenomeen is dat men gangbaar de naam 'stroom' geeft. 'Stroom' heeft niets van doen met stroming en voorlopig ook niet met het begrip lading - dat trouwens ook nooit 'in' voorwerpen te vinden is, maar altijd eromheen of, bij condensatoren, ertussen. Onder het ingeburgerde woord '*stroom*' moet dus verstaan worden: *het magnetische effect dat concentrisch rond een draad werkzaam is.*

We zullen nu het verschijnsel spanning nader onder de loep nemen. Elektrische spanning ontstaat zodra een edel en onedel metaal in een waterige oplossing worden geplaatst (galvanisch element). Er vindt gedurende korte tijd chemische activiteit plaats, die afneemt naarmate de elektrische spanning wordt opgebouwd. Met het bereiken van de maximale spanning houdt de chemische activiteit geheel op. Maken we nu een elektrische kring, dan daalt de klemspanning, terwijl de chemische activiteit toeneemt. Hoe lager de weerstand van de kring, hoe sterker de klemspanning daalt en hoe meer chemische activiteit plaatsvindt. Zo bezien is de chemische activiteit de primaire wil, terwijl het ontstaan van spanning zich als een tegenproces uit: bij een niet-gesloten kring wordt de chemische activiteit geremd door de opbouw van de spanning. Bij een gesloten kring daalt de klemspanning, omdat elektriciteit ernaar streeft om te verdwijnen en daartoe door de kring in de gelegenheid wordt gesteld. Er ontstaat een evenwicht tussen ontstaan en vergaan van elektrische spanning, waarbij de spanning daalt, naarmate de kring minder weerstand heeft en het vergaan dus in sterkere mate plaats heeft.

Men ziet: de chemische processen roepen hun eigen tegenproces op in de vorm van een elektrische potentiaal, die de chemie onderdrukt. Daarnaast werken de gassen en stoffen, die als gevolg van de chemische activiteit ontstaan, ook remmend. Het grote probleem bij het maken van accumulatoren is dan ook het voorkomen dat er chemische tegenprocessen ontstaan, gassen of stoffen die de wil tot chemische activiteit teniet doen. Al eerder werd bij de behandeling van warmtestraling in paragraaf 4.4 (blz. 84) Rudolf Steiner aangehaald, die spreekt over de nijd van de natuur om verschillen en daarmee een perpetuum mobile te laten ontstaan. Vanuit de chemische willende activiteit zou een perpetuum mobile willen ontstaan. Bij de huidige stand van de techniek ontstaan er altijd tegenpro-

cessen die dit verhinderen. Deze tegenprocessen te minimaliseren is het streven van de 19e en 20e eeuwse wetenschap en technologie.

Welke rol speelt de warmte in dit proces? Twee zaken kunnen daarbij in overweging genomen worden. Ten eerste neemt bij de meeste stoffen de weerstand toe met de temperatuur. Het materiaal verzet zich bij toenemende temperatuur steeds sterker tegen het elektrisch-magnetische proces dat eraan opgelegd wordt. De warmteontwikkeling is hier een uitdrukking van verzet. Het geeft het tegenproces weer dat plaatsvindt. In de tweede plaats stelt de warmte zich te weer tegen het 'open scheuren van de ruimte', doordat enerzijds het elektrische veld rond de kring een perifeer gerichte tendens volgt, terwijl anderzijds het magnetische veld punt-gericht is. De warmte wil deze tegengestelde tendensen bijeenhouden en de eenheid bevorderen en werkt daarom ook in deze zin als tegenproces. Het openscheuren van de ruimte door de duale werking van de elektrische en magnetische kracht, dit uiteenvallen in twee tegengestelde tendensen, is vergelijkbaar met het ontstaan van koude, dat altijd naar een isolement voert. De warmte werkt als tegenproces, dat de eenheid in plaats van de tweehed wil bewerkstelligen. Deze beschrijving werpt ook licht op een uitspraak van Rudolf Steiner: 'Een elektrisch proces is eigenlijk het wegzuigen van koude in plaats van het schenken van warmte'.



Figuur 104

Derde voorbeeld van begrips- en ideeënvorming: inductie

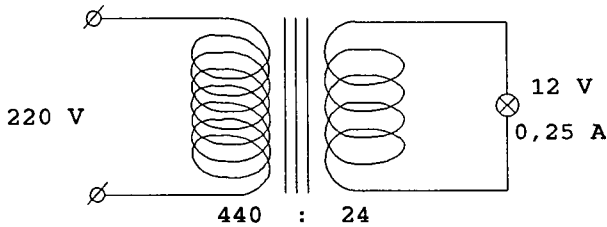
De idee van de inductie is voor het eerst gevonden door de geniale fenomenoloog Michael Faraday (1791-1869). Zijn denken was geheel in de lijn van Goethe, maar ook hij heeft zijn methode niet expliciet uitgewerkt. Hij zocht naar het verband tussen elektriciteit en magnetisme. Omdat met elektriciteit magnetisme kan worden opgewekt, veronderstelde hij dat dit in omgekeerde zin ook mogelijk moest zijn. Zo ontdekte hij de

verschijnselen van de inductie. In paragraaf 5.8.2 is een korte beschrijving van zijn zoektocht opgenomen.

In de volgende uiteenzetting sluiten we aan op de proeven van paragraaf 5.3.3 vijfde waarnemingsreeks (blz. 185 e.v.). Beweegt men een magneet in of rond een spoel, dan zal in de spoel een elektrische spanning worden opgewekt. Evenals bij de elektrische kring is hier sprake van dynamische elektriciteit: zodra elektriciteit ontstaat vergaat hij in de kring van de spoel, mits deze kring gesloten is. De door de bewegende magneet opgewekte spanning, de inductiespanning, leidt in een gesloten kring tot het ontstaan van een magnetisch veld rond de spoel, met een aan de magneet tegengesteld veld als de magneet naar de spoel wordt toe bewogen en een gelijk gericht veld als de magneet van de spoel af wordt bewogen. Het geïnduceerde magnetische veld verzet zich tegen de beweging van de magneet en toont zich dus als een tegenproces. De ring van Thomson wordt door een naar de ring toe bewegende magneet afgestoten en door een van de ring af bewegende magneet aangetrokken. Ook hier uit zich het geïnduceerde magnetische veld als tegenproces. In deze proef komt het behoudende gebaar van magnetisme duidelijk naar voren: het magnetische veld wil zijn toestand handhaven en verzet zich tegen veranderingen. Hoe sneller een magneet in de buurt komt, hoe sterker het tegenproces: er ontstaat een hoge inductiespanning. De proef met zelfinductie (proef 4, blz. 186) laat dit prachtig zien. Dit tegenproces kan zich echter pas manifesteren als de kring van de spoel gesloten wordt. Vandaar dat een dynamo moeilijker aan te drijven is zodra de kring gesloten wordt. Een ander voorbeeld is een electromotor, die lang blijft uitdraaien wanneer de spanning wordt weggenomen. Sluit men tijdens dit uitdraaien de spoelen kort, dan staat de rotor snel stil.

Een toepassing van inductie is naast de dynamo of generator ook de transformator (in de proevenreeks 5 t/m 7, blz. 186 e.v.). Sluit men een wisselspanningsbron aan op de primaire spoel van een transformator, dan kan men de leerlingen het volgende beeld voorhouden. Voor de secundaire spoel is het nu alsof men snel achtereen een magneet in deze spoel steekt, er uit trekt, hem er ongepoold in steekt, er uit trekt, enzovoort. In de secundaire spoel zal dus een wisselspanning worden geïnduceerd. Zie figuur 105.

Varieert men met het sluitstuk van de kern de concentratie van het magnetische veld in de secundaire spoel, dan zal het lampje feller gaan branden, naarmate dit veld zich beter in de kern kan verstoppen. Dit wil zeggen: naarmate het magnetische veld niet meer werkzaam is buiten de kern (meetbaar met behulp van een kompas) wordt het inductie-effect van de spoel groter. Weer toont zich hier de samenballende, inzuigende ten-



Figuur 105

dens van het magnetisme als diametraal tegenover de elektrische inductiespanning, die ernaar streeft om te verdwijnen.

De inductiespanning die ontstaat blijkt evenredig met de windingenverhoudingen:

$$\begin{array}{lcl} U_p : N_p & = & U_s : N_s \\ 220 : 440 & = & 12 : 24 \end{array}$$

Op dit verband kan men op negende klas niveau niet nader in gaan.

Sluit men de kring van de secundaire spoel, dan zal de spanning over deze spoel dalen naarmate de weerstand van de secundaire kring lager is. Tegelijkertijd zal de stroom in de secundaire kring sterk toenemen. Ook bij een open secundaire kring was er al stroom in de primaire kring. Deze neemt verder toe, naarmate de secundaire kring zwaarder belast wordt. Hierdoor werkt de stroom in de secundaire spoel uiteindelijk als mee-proces terug op de primaire spoel. Het proces van vergaan van de elektriciteit in de primaire kring wordt dus sterker wanneer de secundaire kring gesloten wordt. Men kan ook zeggen dat de weerstand van de primaire kring als het ware lager wordt: het is alsof de zelfinductie van de primaire kring verlaagd wordt. Bij geringe secundaire belasting blijkt het produkt van de stroom en het aantal windingen van primaire en secundaire spoel gelijk te zijn:

$$I_p \times N_p = I_s \times N_s$$

Hieruit blijkt dat spanning en stroom volgens tegengestelde wetten transformeren: de spanning volgens een constante verhouding, de stroom volgens een constant produkt. Het produkt spanning x stroom blijft behouden, op een klein verlies na, dat bij een goede transformator enkele procenten bedraagt. Bij een zwaardere secundaire belasting zal de secundaire stroom groter en de spanning kleiner zijn dan de windingverhoudin-

gen aangeven. Het produkt van beide verhoudingen blijft echter wel constant:

$$\frac{U}{N} \times I.N = \text{constant}$$

$$U \times I = \text{constant}$$

Bij niet al te grote belasting van de secundair spoel blijft dus het *vermogen* $P = U \times I$ behouden. Dat het produkt van spanning en stroom gelijk is aan het vermogen P kan als volgt verduidelijkt worden. De elektrische spanning in een kring hebben we eerder beschreven als wil tot verdwijnen, de stroom als het magnetische effect dat daarbij ontstaat. Dan wordt het voor leerlingen duidelijk dat het vermogen gelijk is aan wil $\times$ effect: mijn 'vermogen' tot huiswerk maken uit zich in de ingezette wil *en* in het bereikte effect. Een mogelijke vergelijking is ook: $P = F \times v$, vermogen is kracht maal snelheid, ofwel wil maal effect. In de transformator blijft het vermogen bij het transformeren behouden, hoewel een klein verlies optreedt. Dit verlies blijkt evenredig met de in de kern ontwikkelde warmte: de transformator zou een perpetuum mobile kunnen zijn, maar tegenprocessen in de vorm van warmteontwikkeling verhinderen dat.

5.6 Opgaven

Net als bij het onderwerp warmte geeft het maken van opgaven de leerlingen houvast. Enerzijds omdat de eerder gevonden wetmatigheden concreet worden gemaakt, anderzijds omdat begrippen als spanning, stroom (= magnetisch effect) en vermogen door het maken van opgaven voor de leerlingen helderder kunnen worden: telkens wordt men weer gedwongen zich te realiseren: wat is 'U', waar staat spanning voor en wat is de logica van de vergelijking $I = U/R$? Als voorbeeld zullen hieronder enige opgaven gegeven worden.

1. Op een lampje staat 6V/0,045A.
 - a. Teken een kring met daarin het lampje.
 - b. Bereken de weerstand van de gloeidraad.
 - c. Hoe groot is het vermogen?
2. Op een lamp staat 75 Watt/220V.
 - a. Teken de kring en bereken de weerstand van de gloeidraad.

- b. Hoe groot is de stroom (magnetisme) van de kring?
3. Aan een kerstboomlampjessnoer zitten 20 lampjes. De aansluitspanning is 220V. De magnetische intensiteit van de kring is 0,1A.
Bereken: de spanning over ieder lampje;
het vermogen van ieder lampje;
de weerstand van iedere gloeidraad.
4. Op een lampje staat 6V/0,45A.
a. Bereken de weerstand (Ohm) en de geleidbaarheid (Siemens).
b. Hoe groot is het vermogen van het lampje?
5. Op een straalkachel staat 1000 Watt/220V.
Bereken de stroom en de geleidbaarheid van de kring.
6. Op een straalkachel staat 2x750 Watt/220V.
Teken de kring (2 standen zijn mogelijk, parallelschakeling).
Bereken de magnetische intensiteit (stroom) van de kringen.
7. In ieder klaslokaal zitten vier lampen van 200 Watt/220V.
Teken de kringen.
Bereken de stroom van iedere kring.
Bepaal de stroom van de kabel bij de meterkast.
Zoek uit wat er zoal in een meterkast aanwezig is en teken dit schematisch.
8. Een transformator voor de huisbel geeft secundair 6V wisselspanning (primaire 220V).
Bereken de verhouding van de windingen.
De bel heeft spoelen met een weerstand van 12 Ohm.
Teken de schakeling met bel, transformator en drukknop.
Bereken de stroom en het vermogen van de primaire en secundaire kring.
9. De verwarmingsspiraal van een broodrooster is gemaakt van chroom-nikkeldraad (weerstand 1 Ohm/mm²/m). De draadafmetingen zijn 5 x 0,4 mm. De lengte is 2 x 3 meter (twee spiralen in serie).
Bereken de magnetische intensiteit (stroom) van de kringen en het totale vermogen.
10. Gegeven een kring met drie weerstanden.
Bereken de stromen en de spanning over iedere weerstand.

11. Een ampèremeter (magnetometer) $\Delta V = 100\text{mV}$, $I_{\text{max}} = 1\text{mA}$ wordt gebruikt om spanning te meten. Hiertoe moet het meetbereik van de meter veranderd worden van 100mV tot 100V . Hoe groot moet de voorschakelweerstand dan zijn?
12. Een ampèremeter ($I_{\text{max}} = 1\text{mA}$ en $V = 100\text{mV}$) wordt gebruikt om een stroom (magnetisme, warmte) van 3A te meten. Hoe moet het meetbereik aangepast worden? Bereken de shunt.
13. Teken een kring met een spanningsbron van 220V , een lamp van $60\text{Watt}/220\text{V}$, een ampèremeter en een voltmeter over de lamp. Welke aanpassingen moeten er aan de meters plaats vinden? (Op beide meters staat 1mA en 100mV). Bereken de voorschakelweerstand en de shunt.

5.7 De technische toepassing

In deze paragraaf zullen enige technische toepassingen van elektriciteit en magnetisme worden besproken, die nauw aansluiten bij de behandelde lesstof. Zoals in paragraaf 5.8.1 'De ontwikkeling van de elektriciteitsleer en haar toepassingen' zal worden beschreven, hebben in het verleden ontdekkingen op het gebied van de elektriciteit en het magnetisme vrijwel steeds direct geleid tot technische toepassing. Nog meer dan dat bij andere natuurkrachten het geval is heeft de technische toepassing de ontwikkeling van de theorie gestimuleerd. De oorzaak hiervan is gelegen in een kenmerk van de menselijke verhouding ten aanzien van zowel elektriciteit als magnetisme, namelijk het gegeven dat deze krachten zich onttrekken aan de directe menselijke waarneming. Dit vraagt enerzijds om een meer begripsmatige benadering van deze fenomenen. Anderzijds zullen juist de ervaringen die men opdoet bij het praktische aanwenden van elektrische en magnetische kracht leiden tot meer inzicht. Voor de leerlingen werkt het zeer verhelderend om te zien hoe voor hen moeilijke begrippen als spanning, stroom en inductie toegepast kunnen worden op technische apparatuur.

De luidspreker

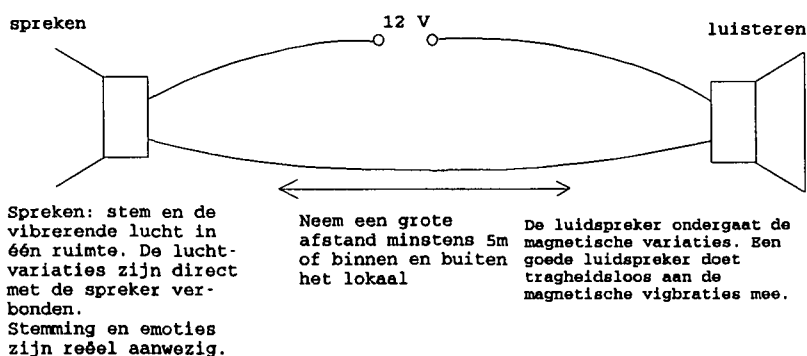
Enige proeven die men kan tonen zijn reeds besproken in paragraaf 5.3 derde voorbeeld (blz. 183). Deze proeven maken aanschouwelijk dat een wisselspanning, aangesloten op de spoel van een luidspreker, deze spoel tot trilling brengt. Het trilleritme volgt het ritme van het wisselen van

de spanningspolariteit, zodat kwantitatief geldt: frequentie wisselspanning = frequentie (geluids)trilling. Het is belangrijk de leerlingen erop te wijzen dat dit niet betekent dat wisselspanning ook trilling is. Heeft de wisselspanning een constante frequentie, dan wordt een regelmatige toon hoorbaar. Hierbij treedt het gevaar op dat men trilling en klank gelijkstelt, of alleen de eerste aanziet voor reëel en de tweede als illusie beschouwt. Neemt men de klank, als secundaire waarneming (zie paragraaf 3.3, blz. 36 e.v.), even reëel als de uiterlijke trilling, dan kan men tot de gedachte komen dat het wezen van de klank zich kan verbinden met de uiterlijke trilling. Hoe men deze kwestie met de leerlingen bespreekt zal uit de lessituatie moeten blijken. Men kan bijvoorbeeld zeggen dat het geluid twee kanten heeft, een uiterlijk trillende en een innerlijk beleefde toonkwaliteit. Dit punt zal ten aanzien van de telefoon nog nader worden besproken.

De telefoon

Uit de proeven in paragraaf 5.3 vierde voorbeeld (blz. 184) blijkt dat de werking van de koolstofmicrofoon in het spreekgedeelte van een telefoonhoorn berust op weerstandsvariaties van de koolstof onder invloed van drukverschillen in de lucht. Deze weerstandsvariaties leiden vervolgens tot stroom/magnetische variaties in de elektrische kring, waarin de koolstofmicrofoon is opgenomen. De luidspreker volgt deze magnetische variaties en komt tot trilling.

De werking van de telefoon is altijd weer verrassend voor leerlingen. Er wordt haast geen materiaal gebruikt, alleen wat draadjes en toch hoor je 'aan de andere kant' een stem.

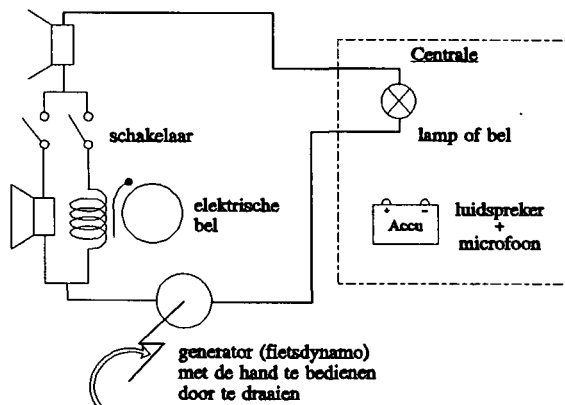


Figuur 106

De microfoonconus is zo opgehangen dat hij gemakkelijk meebeweegt met de lucht zonder natrileffecten. In de gehele kring zijn magnetische variaties die overeenkomen met de luchtvariaties. Een stem is daar natuurlijk niet te vinden. Maar wanneer men de magnetische variaties zou kunnen lezen dan kan men de 'boodschap' begrijpen. De luidsprekerspoel en -conus doen ook mee aan de kringvariaties en brengen de omringende lucht in beweging. De luidspreker moet zo goed mogelijk aan de opgedrongen beweging meedoen, anders ontstaan er storende effecten. Men gaat dan te veel de luidspreker horen, terwijl men alleen de opgelegde beweging zou moeten horen. De emoties, geladen stiltes en stemmingen werken niet in de ruimte waar de luidspreker staat. De luisteraar moet deze emoties zelf toevoegen en dit gaat beter naarmate er meer ervaring of fantasie aanwezig is. Ook kunnen effecten opgewekt worden door veel baseffect op hard/zacht te regelen, enz.

Overziet men de gehele situatie, dan ontstaat het volgende beeld. Degene die in de microfoon spreekt brengt zelf klank voort. Daarbij treden in de omringende lucht gestalten op van verdikkingen en verdunningen (het gebruikelijke woord 'luchttrillingen' is ongelukkig gekozen, de lucht trilt niet). Als gevolg hiervan komt het membraan van de microfoon tot trilling. Omdat de luidsprekerconus deze vibraties volgt, ontstaan in de ruimte waarin de luidspreker staat opgesteld overeenkomstige verdikkings- en verdunningsgestalten in de lucht, waar zich eveneens overeenkomstige tonen mee kunnen verbinden. Het elektrische proces volgt de vibraties als een elektrische 'kopie'.

De telefooncentrale

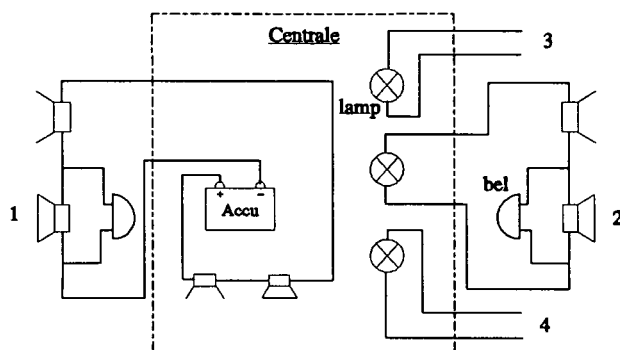


Figuur 107

De eerste telefooncentrales werden volledig met de hand bediend. In de woning was een telefoontoestel met microfoon, luidspreker, bel en generator. Verder was er een verbinding met de centrale.

Werking:

Neem de hoorn (luidspreker) van de haak. De bel wordt uitgeschakeld en de luidspreker ingeschakeld. Draai aan de generator, deze geeft in de gesloten kring een magnetisch en een warmte-effect. In de centrale gaat een lampje branden of een bel rinkelen. Vervolgens wordt in de centrale de kring verbroken en wordt er een accu met microfoon en luidspreker tussen geschakeld. De kring bestaat nu uit één accu en twee keer een luidspreker en microfoon, één bij de centrale en één bij de abonnee.



Figuur 108

Persoon 1 vraagt nu aan de centrale om doorverbonden te worden met persoon 2. De centrale laat nu persoon 1 wachten en maakt zelf een kring met persoon 2. In de kring zit de accu. De bel zal dus bij persoon 2 gaan rinkelen. Persoon 2 neemt op en de centrale zegt: ik verbind u door met persoon 1. Nu worden de leidingen van persoon 1 en 2 (met accu) doorverbonden en kunnen ze met elkaar spreken. In de kring bij de centrale zit ook nog een lampje om te kunnen zien wanneer het gesprek afgelopen is, zodat de kring kan worden verbroken. De schakelaar A wordt dan door de abonnee in de middenstand geplaatst.

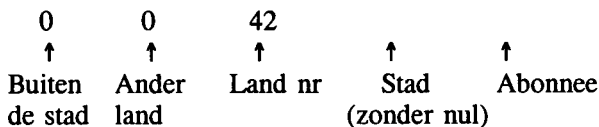
De volgorde is dus:

- contact opnemen met de centrale;
- verzoeken om een bepaalde doorverbinding;
- doorverbinding maken;
- contact verbreken.

Het is ook nog mogelijk dat de centrale eerst contact moet maken met een andere centrale of centrales en daarna pas met de gevraagde persoon. Tegenwoordig worden nog al deze stappen doorlopen, alleen nu automatisch of elektronisch. Bijvoorbeeld:

- Men woont in Utrecht en wil naar Eindhoven bellen.
- Men neemt de hoorn van het toestel → Een schakelaar wordt omgezet en een kring met de centrale wordt gerealiseerd. Men draait 040 → De nul wil zeggen dat de centrale geen doorverbinding gaat maken in Utrecht maar met een andere centrale in het land. Het stadsnummer van Eindhoven is 40. (De grote steden hebben als nummer een tiental: 010 Rotterdam, 020 Amsterdam, 030 Utrecht, 050 Groningen. De iets kleinere steden daaromheen een getal daarop volgend, bijvoorbeeld Haarlem 023, Heerlen 043. De gebieden rondom de grote steden hebben een streek- en plaatsnummer, bijvoorbeeld rondom Breda 016.. (Oosterhout 01620 enzovoort) of rondom Rotterdam 018.. (Krimpen 01807)).
- Daarna draait men het abonneenummer.

Internationaal is de betekenis van de cijfers als volgt:



In de grote steden is de stad onderverdeeld in sub-centrales en betekenen de eerste cijfers de keuze van zo'n sub-centrale bijvoorbeeld

Rotterdam 010 - 4215368
 ↑
 Wijk Alexanderpolder

Binnenkort wordt in Nederland het 10 cijferige telefoonnummer ingevoerd. De werking van de automatische doorverbinding is met relais nog betrekkelijk eenvoudig, maar elektronisch of met glasvezels is dit voor de 9de klas niet aan de orde.

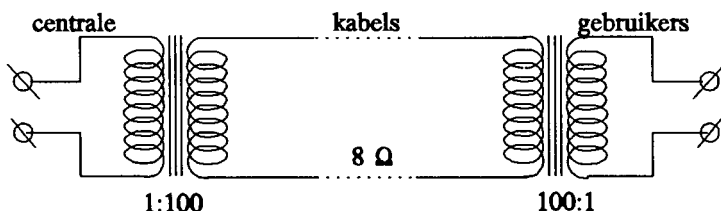
Het geeft in de klas wat fanatisme wanneer gevraagd wordt wat de communicatie van de toekomst is. Aan de hand van zo'n gesprek kan een indeling gemaakt worden uitgaande van de mens:

- hoofd - informatiemachines, rekenmachines (computer, zakreken-machine);
- romp - communicatie-apparatuur (telefoon, radio, tv);
- ledematen - krachtmachines (fiets, motor, auto, trein, elektromotor).

In aansluiting op de extreme fantasieën kunnen vervreemding, kunstmatige intelligentie, creatieve denkkraft, echte ontmoeting en dergelijke aan de orde gesteld worden. Wat vraagt de toekomst van de mens, zijn dat vooral meer machines, of is het menselijk contact en creativiteit? Deze onderwerpen geven voldoende gespreksstof.

De transformator

In paragraaf 5.3 vijfde waarnemingsreeks (blz. 185 e.v.) werden al enige toepassingen middels proefopstellingen besproken: het punt-lasapparaat en de Ruhmkorff inductor. Met behulp van de transformatiewetten (zie paragraaf 5.5, inductie, blz. 199 zijn deze toepassingen snel inzichtelijk te maken. Een andere toepassingsgebied vormt de elektriciteitscentrale. Stel in een land als Chili (2000 km lang) zou in het noorden één centrale staan, terwijl geen transformatoren worden gebruikt. In het zuiden ligt een stad die een elektrisch vermogen van 2,2 MW gebruikt. De 2000 km lange kabels hebben een weerstand van 8Ω . Bij een geleverde spanning van 220 V zal het magnetisch effect/stroom in de kabels $2.200.000 / 220 = 10.000$ A bedragen. Het spanningsverlies in de kabels bedraagt $8 \times 10.000 = 80.000$ V. Met andere woorden: zonder transformatoren gaat het niet. Een rekenvoorbeeld mét transformatoren leert hun grote nut:



Figuur 109

Stel de centrale levert een spanning van 220 V bij een stroom van 20.000 A. Secundair moet een spanning van 22.000 V en een stroom van 100 A aanwezig zijn. Het spanningsverlies in de kabels bedraagt $100 \times 8 = 800$ V, zodat op de primaire spoel van de gebruikers-transformator een spanning van 21.200 V staat. Secundair moet dan een spanning van 212 V

en een stroom van 10.000 A aanwezig zijn. Er is maar 8 V verloren gegaan (3,6% vermogensverlies).

Aansluitend kan men berekeningen maken met reële spanningen en tussentransformatoren. Een bezoek aan een elektriciteitscentrale is zeer illustratief, temeer omdat men daar ook grote generatoren en stoomturbines in ogenschouw kan nemen.

5.8 Enkele historische gegevens

5.8.1 De ontwikkeling van de elektriciteitsleer en haar toepassingen

Beschouwt men de technologische ontwikkeling op het gebied van de elektriciteitsleer, dan valt op dat deze direct samenhangt met de ontdekkingen van elektrische basisfenomenen. Een ambachtelijke fase, zoals deze optrad op het gebied van architectuur, hout-, metaal- en steenbewerking heeft bij de elektriciteit niet plaatsgevonden. Vrijwel direct na een bepaalde ontdekking worden toepassingen bedacht en technisch uitgewerkt. De technologie ondergaat gestaag verbeteringen en de toepassingen lijken onuitputtelijk. De elektriciteitsleer heeft zich in de afgelopen eeuwen versneld ontwikkeld. Een belangrijk omslagpunt ligt daarbij rond 1800, wanneer Alessandro Volta (1745-1827) op 20 maart 1800 een brief schrijft aan de Royal Society te Londen om te berichten over het galvanische element. Voor 1800 was - vanuit de huidige ontwikkeling gezien - alles nog spel, het was zelfs een bepaalde tijd mode experimenten te doen met statische elektriciteit. Aan praktische ontwikkeling werd nog nauwelijks gedacht. Na 1800 zet de ontwikkeling versneld in, ondermeer door de expansiedrang van Napoleon en de industriële revolutie. Vanaf dat moment gaat de ontwikkeling hand in hand met de technische toepassing. Een kort overzicht van de ontwikkeling in de 19e eeuw:

1800	Volta-zuyl	
1820	Elektro-magnetisme, Oersted	basisfenomeen van het elektrisch kringproces
1821	Elektromotor-principe, Faraday	
1832	Telegraaf, Morse	
1831	Inductie, Faraday	magneto-dynamische elektriciteit
1832	Dynamo, Faraday	
1875	Telefoon, Bell	
1879	Gloeilamp, Edison	
1882	Eerste elektriciteitscentrale	

1885	Eerste stad verlicht (Illinois)
1883	Eerste elektrische trein
1899	Marconi maakt radiocontact tussen Engeland en Frankrijk

In het laatste decennium leidde de ontwikkeling van de gasbuizen (Crookes en Röntgen) tot de ontdekking van radioactieve verschijnselen (Curie en Becquerel).

Werd in de 19e eeuw de basis gelegd voor de krachtmachine en de communicatietechniek, in de 20e eeuw worden deze gebieden verder ontwikkeld en wordt de informatie- en besturingstechniek ontwikkeld. De wereldcommunicatie en de massa-informatie komen tot stand. Al deze ontwikkelingen hebben de slavenarbeid langzamerhand vervangen. De mens die zich van deze techniek bedient moet zich echter wel naar deze techniek richten. Hoewel de elektriciteit een slaaf bij uitstek is, dreigt de mens meer en meer zelf slaaf van de technologische ontwikkeling op dit gebied te worden. Dit hangt samen met de drievoudige wijze, waarop de mens zich moet aanpassen aan de techniek. Op denk-gebied past men zich aan aan de informatietechnologie, op gevoelsgebied, met name in sociale zin, aan de communicatietechnologie en op het gebied van het handelen aan de krachtmachines.

De ontwikkelingen in de 20e eeuw volgen elkaar in steeds sneller tempo op. Historisch kan de ontwikkeling in termijnen van 33 jaar verdeeld worden:

1900	<i>radiozender</i>
1933	<i>tv</i>
1966	<i>satellietverkeer en computernetwerken</i>
1913	transatlantische zender;
1914	radiobuis zender;
1919	de radio wordt algemeen;
1928	eerste tv-uitzending;
1935	eerste toespraak voor televisie (nazies);
1939	10.000 tv-toestellen;
1961	142 miljoen tv-toestellen;
1951	Paus Pius XII verklaart de aartsengel Gabriël tot hemelse patroon voor het tv-wezen;
1941	eerste rekenmachine, K. Zuse;
1965	satelliet op 36.000 km hoogte;
1978	glasvezel-techniek wordt ingevoerd.

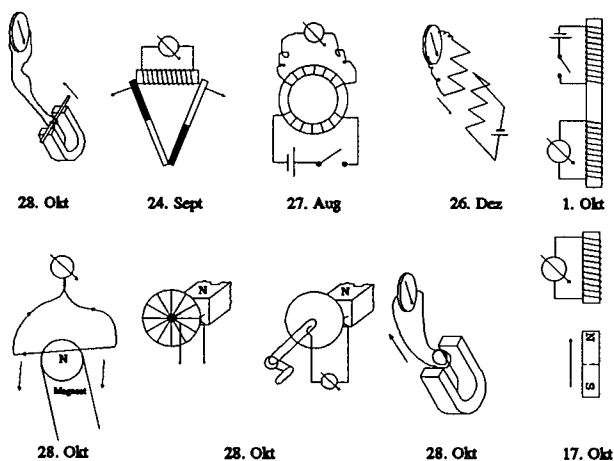
In de negende klas periode staan vooral de geschetste ontwikkelingen in de 19e eeuw centraal, in de 10e en 11e klas die van de 20e eeuw.

5.8.2 Faraday en de ontdekking van de inductie

In deze paragraaf volgt een korte beschrijving van hoe Michael Faraday tot de ontdekking van het verschijnsel inductie kwam.

Faraday ging uit van de wetmatigheid van de polariteiten. Wanneer door verdwijnende elektriciteit in een kring magnetisme en warmte ontstaan, dan moet ook omgekeerd door warmte of magnetisme elektriciteit kunnen ontstaan. Rond 1822 was dit het uitgangsidee van Faraday. Van 1831 tot 1839 werkte hij hier op een zo sterk inlevende manier aan, dat hij vier jaar nodig had om weer op krachten te komen, onder ander in een sanatorium in Zwitserland.

In 1831 hield Faraday voor de Royal Society in Londen een voordracht, die hij afslot met de woorden: 'De resultaten zijn niet gebracht in de volgorde waarin ze ontdekt zijn, maar zo dat u het helderste overzicht krijgt.' Hij koos voor zijn uiteenzetting de volgende proevenreeks (zie *Illustrierte Geschichte der Elektrizität* van F. Frannberger, Aulis Verlag, 1985).



Figuur 110

Bij deze proeven had Faraday de volgende overwegingen. In de proefopstelling van 1 oktober waren de spoelen zeer dicht bij elkaar. Alleen bij

in- en uitschakelen reageerde de meter. Kwam dit door contacteffecten of door iets anders? Zijn volgende proef bestond uit eerst inschakelen en dan pas naar elkaar toe bewegen. Ook nu sloeg de meter uit. De meter sloeg ook uit wanneer na schakelen de ijzerkern toegevoegd werd. Kwam dit door het ijzer? Om dit na te gaan bedacht hij de proef van 17 oktober: neem direct een magneet en beweeg die in een spoel, dan is geen ijzer en batterij nodig. Verrassend voor Faraday was vooral dat er alleen iets plaatsvond bij in- en uitschakelen. Bij het heen en weer bewegen van de magneet was deze vraag als het ware beantwoord.

Bij een bepaalde gelegenheid werd Faraday na afloop van een voordracht de vraag gesteld, wat het nut van dergelijke proeven zou kunnen zijn. Faraday antwoordde met de historische woorden: "What's the use of a child?"

Literatuurlijst boeken

Hoofdstuk 1

Grosse, R.: *Erlebte Pädagogik. Schicksal und Geistesweg*, Dornach 1975.

Hartmann, G.: *Opvoeden uit inzicht*, Zeist 1977.

Heydebrand, C. von: *De ziel van het kind*, Zeist 1992.

Leber, S.: *Die Sozialgestalt der Waldorfschule*, Stuttgart 1991.

Leber, S., Schad, W., Suchantke, A.: *Geschlechtlichkeit des Menschen*, Stuttgart 1989.

Lievegoed, B.C.J.: *Ontwikkelingsfasen van het kind*, Zeist 1993.

Lindenberg, C.: *Die Lebensbedingungen des Erziehens - von Waldorfschulen lernen*, Reinbek 1985.

Rauthe, W.: *Die Waldorfschule als Gesamtschule*, Stuttgart 1975.

Steiner, R.: Gesamt Ausgabe (GA) 293 t/m 311, Dornach.

Hoofdstuk 2

Baravalle, H. von: *Zur Pädagogik der Physik und Mathematik*, Stuttgart.

Landweer, P.M.: *Natuurkunde, proevenmateriaal voor de 6e en 7e klas*, VPC, leerplanwerkboek nr. 4, 1994.

Stockmeyer, E.A.K.: *Rudolf Steiners Lehrplan für die Waldorfschule*, Stuttgart.

Stockmeyer, E.A.K.: *Zur Methodik des Physik-Unterrichts*, Stuttgart 1961.

Hoofdstuk 3

Amons, F., Beekman, W., Romunde, R. van: *Antroposofie en natuurwetenschap*, Zeist 1981.

Goethe, J.W.: *Farbenlehre*, Band 2, Stuttgart 1988.

Heisenberg, W.: *Das Naturbild der heutigen Physik*, Hamburg 1970.

Heisenberg, W.: *Wandlungen in den Grundlagen der Naturwissenschaft*, Stuttgart 1959.

Hegelmann, E.: *Zur Methodik in der Physik insbesondere der Wärmelehre*, Diss. Darmstadt 1928.

Hemleben, J.: *Das haben wir nicht gewollt*, Frankfurt a.M., Fischer Taschenbuch 5508.

Lehrs, L.: *Mensch und Materie*, Frankfurt a.M. 1987.

Kuhn, T.S.: *The Structure of Scientific Revolutions*, The University of Chicago 1970.

Romunde, R. van: *De grondslagen van Goethe's fenomenologische methodiek*, Mikrokosmos 1, L. Bolk Instituut, Driebergen 1987.

Romunde, R. van: *Materie en straling in ruimte en tijd*, Zeist 1979/1981.

Schmundt, W.: *Zwei Grundprobleme des 20. Jahrhunderts*, Freie Volkshochschule, Argental.

Siepmann van den Berg, J.J.: *Goethe's methoden van natuuronderzoek*, Mikrokosmos, L. Bolk Instituut, Driebergen 1987.

Steiner, R.: GA 1 t/m 6, 18 en 20, Dornach.

Steiner, R.: *Die Erkenntnis der Seele und des Geistes* (GA 56), voordracht van 17-10-1907: *Die Naturwissenschaft am Scheideweg*, Dornach 1985.

Steiner, R.: *Waarnemen en denken*, Zeist 1984.

Steiner, R.: *Einleitungen zu Goethes Naturwissenschaftlichen Schriften* (GA 1), Dornach 1987.

Weizäcker, F. von: *Die Einheit der Natur*, München 1971.

Hoofdstuk 4

Baravalle, H. von: *Physik als reine Phänomenologie*, Bd. 1, 2 en 3 (Licht, warmte, mechanica), Bern 1951.

Bühler, W.: *Nordlicht, Blitz und Regenbogen*, Dornach 1972.

Buck, P., Mackensen, M. von: *Naturphänomene erlebend verstehen*, Köln 1988.

Faraday, M.: *Naturgeschichte einer Kerze*, Bad Salzderfurth, 1980.

Hegelmann, E.: *Zur Methodik in der Physik insbesondere der Wärmelehre*, Diss. Darmstadt 1928.

Huseman, F.: *Das Bild des Menschen als Grundlage der Heilkunst*, Stuttgart 1991.

Julius, F.H.: *Metamorfose*, Zeist 1994.

Kiaulehn, W.: *Die eisernen Engel*, herdruk Vrij Pedagogisch Centrum 1990.

Lievegoed, B.C.J.: *Mens op de drempel*, Zeist 1993.

Locher-Ernst, L.: *Projektive Geometrie*, Dornach 1980.

Locher-Ernst, L.: *Raum und Gegenraum*, Dornach 1988.

Marti, E.: *Die vier Aether*, Stuttgart 1990.

Mackensen, M. von: *Klang, Helligkeit und Wärme*, Pädagogische Forschungsstelle, Kassel 1988.

Macauley, D.: *Over de werking van de kurketrekker en andere machines*.

Romunde, R. van: *Materie en warmte en Geluid, elektriciteit en magnetisme*, Zeist 1979/1981.

Schiller, P.E.: *Vom Wesen der Wärme*, Dornach 1961.

Steiner, R.: *Die Evolution vom Gesichtspunkte des Wahrhaftigen* (GA 132), Dornach 1987.

Steiner, R.: *Filosofie der vrijheid*, Katwijk 1993.

Steiner, R.: *De wetenschap van de geheimen der ziel*, Zeist 1993.

Steiner, R.: *Uit de Akasha-kroniek*, Zeist 1985.

Steiner, R.: *Geisteswissenschaftliche Impulse zur Entwicklung der Physik*, deel 2 (GA 231) Dornach 1982.

Steiner, R.: GA 320-327, Dornach.

Unger, G.: *Physik am Scheideweg*, Dornach 1948.

Unger, G.: *Vom Bilden physikalischer Begriffe*, Teil I-II-III, Stuttgart 1959/1961/1967.

Hoofdstuk 5

Hofberger, W.: *Elektrowerken, Bau eines Meßgerätes, eines Lautsprechers und eines einfachen Transistorradios*. Zum Einsprachler-Förderunterricht der 9. und 10. Klasse, zusammen mit. 28 S.

Fraunberger, F.: *Elektrizität im Barock*, Köln 1960.

Fraunberger, F.: *Das Experiment in der Physik*, Vieweg.

Fraunberger, F.: *Vom Frosch zum Dynamo*, Köln 1960.

Tijdschriften

Hoofdstuk 2

- Erziehungskunst.
Jaargang nr. XXXVI
11-72
- Kraul, W. Physik. Physik-Epoche in einer
7. Klasse - mit Zeichnungen.
- XL 7/8
10-76
- Mackensen von, M. Physik. Der Akustik-Unter-
richt und die Musik.
Erkenntniswege und Methoden des ersten Phy-
sikunterrichts in der 6. Klasse .
- VOK
- Jaargang nr. 26-3-18
15-18-38
15-14-3
- Natuurkunde klas 6 t/m 12.
Natuurkunde klas 7.
Natuurkunde klas 6/klas 8.

Hoofdstuk 3

- Interesse
- Jaargang nr. 1993-0
1994-1
- Siepman van den Berg, B. Goethe's fenomenolo-
gische methode.
Van der Vleuten, F. Over de fenomenologische
methode.

Hoofdstuk 4

- Elemente der Naturwissenschaft
- Jaargangnr. 1980-33
1985-43
- Bauer. H. Stufen des Wärmegeschehens.
Dustmann, F.W. Energie, Wärme und Opfer.
Zur Begriffsbildung in der Wärmelehre.
- Erziehungskunst
- Jaargangnr. 12/83 737
2/79 65
- Bauer, H. Physik, Mikroelektronik, Kernener-
gie. Vom Wesen der Elektrizität.
Mackensen v., M. Kernenergie. Physik, Mikro-
elektronik, Kernenergie. Analytisches oder syn-
thetisches Lehren. Zur Didaktik von Lokomotive
und Wärmelehre im Physikunterricht der 9.
Klasse.

- 3/79 137 Mackensen von, M. Physik, Mikroelektronik, Kernenergie. Analytisches oder synthetisches Lehren. Zur Didaktik von Lokomotive und Wärmelehre im Physikunterricht der 9. Klasse (Schluß).
- 7-8/84 443 Steppuhn, G. Physik, Mikroelektronik, Kernenergie. Aspekte zur Physikepoche der neuntem Klasse.
- M 7-25 Strakosch. Physik. Mensch und Wärme.
- 5/81 251 Wenger, P. Physik, Mikroelektronik, Kernenergie. Der Magnetismus.
- 43, Mackensen von, M. Analytisch und Synthetisch
S. 65-74 Lehren, Zur Didaktik von Lokomotive und
u. 137-145 Wärmelehre in Physikunterricht der 9. Klasse.
1979

Mathematische physikalische Korrespondenz

- Jaargangnr. 2, 2-9 Adams. Wärmeausdehnung (→ auch Wärme).
- 5, 7-8 Katz. Wärmeausdehnung (→ auch Wärme).
- 31, 5-12/ Nantke. Wärme (→ auch Arbeit, Energie,
32 Ätherlehre, Methoden).
- 26, 1-19 Schmundt. Wärme (→ auch Arbeit, Energie,
Aetherlehre, Methode).

Die Menschenschule

- Jaargangnr. 58-276 Physik, Warmteleer.
- Jaargangnr. 37-13 Naturkunde Klas 9.
XXXII
- 9-58 Ringel, E. Physik. Bedeutung der 'Wärmelehre' für den Jugendlichen.
Stockenmeyer, E.A.K. Physik. De Physikunterricht als lebendige Begriffsschulung.

Hoofdstuk 5

Erziehungskunst

- Jaargangnr. XXXVIII
7/8-74 Kraul, W. Physik. Magnetismus in der Mittelstufe.

ISBN 90-800739-3-8

