

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.

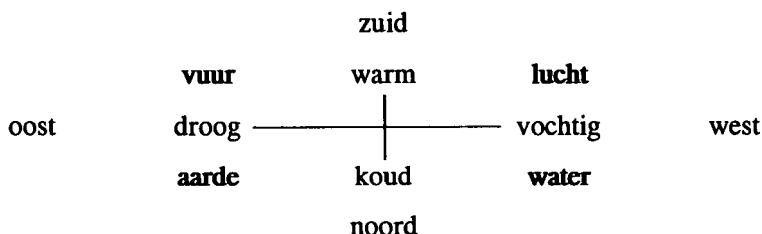
elementenkrachten

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).

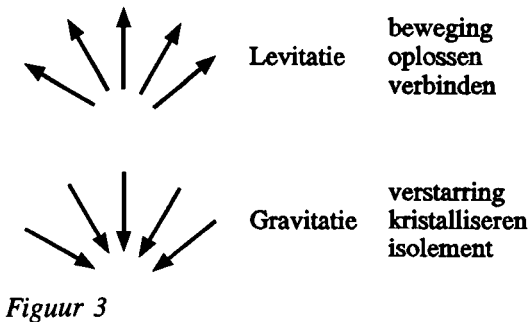
In de achtste klas komt de tegenstelling van centrifugale en centripetale krachten ook aan de orde in de vorm van de samenballende en verwijlende krachten: gravitatie en levitatie. De gravitatietendens drukt zich

uit in het gewicht van voorwerpen, in het feit dat vloeistof een oppervlak-begrenzing heeft en in de hechtheid van stoffen. De levitatie-tendens 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 begripvorming 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:	begripvorming (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), stoomcilinder (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, inspuitpomp);
- 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. Gecomplieerde 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

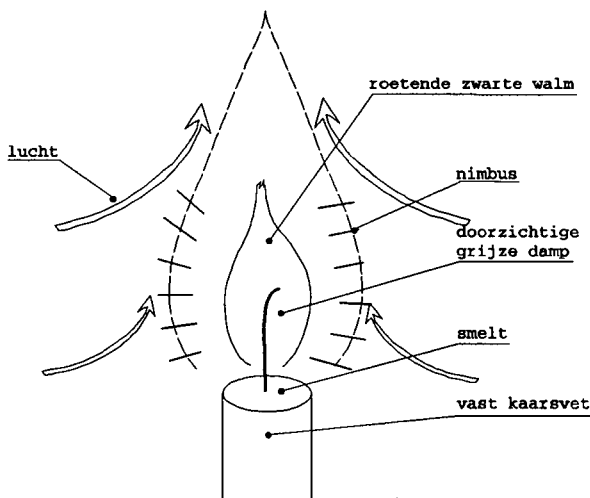
Twee voorbeelden van ervaringsreeksen worden geschetst: de kaars en de proef van Franklin.

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 laat 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 *lichtschijnsel*. 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

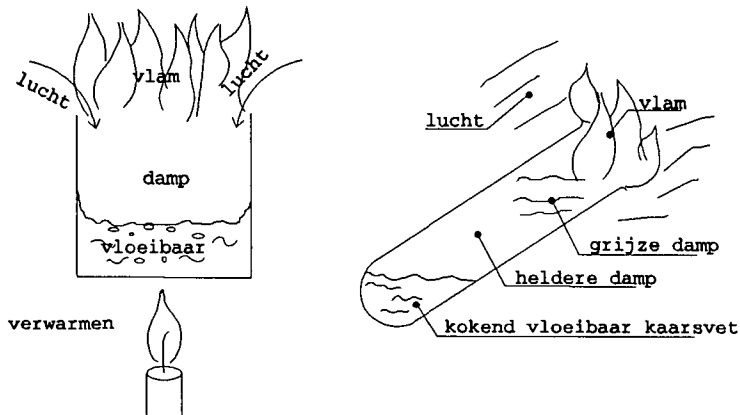
De omringende lucht en de lont spelen een belangrijke rol bij de vorm van de vlam. Verhoogt men met een kraagje de bovenkant van de kaars, dan gaat de vlam uit. Plaats de kaars in een glas en draai het in een boog rond dan zal de vlam verrassend genoeg naar binnen wijzen. Plaats men de kaars voor een 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.

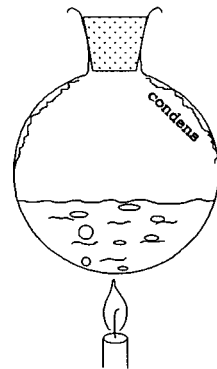
Tweede voorbeeld van een ervaringsreeks: kook- en vriespuntsverandering aan de hand van de proef van Franklin

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.

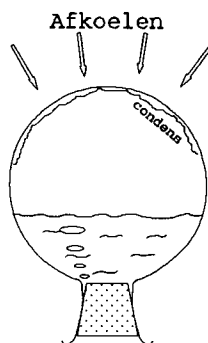


Figuur 6

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.

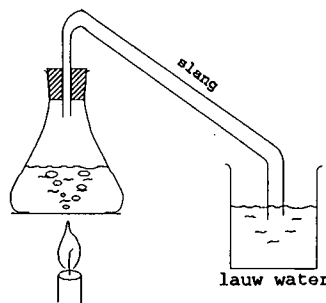
Een beeld maakt de proef nog onvergetelijker door te zeggen 'aai hem zachtjes over z'n bol en dan is hij weer blij'. Wrijf dan met de natte doek over de kolf en het koken begint weer.

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 bekersglas met koud water ziet men luchtbellen uit de slang komen en naar boven borrelen. Kookt het water dan neemt het aantal luchtbellen 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 bekersglas 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 langwerpige 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

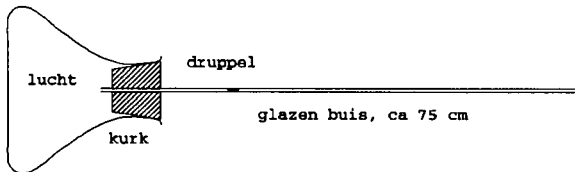
In deze paragraaf zijn meerdere voorbeelden van waarnemingsreeksen opgenomen, waarvan de begripsvorming in paragraaf 4.5 volgt. De voorbeelden die in deze paragraaf zijn opgenomen luiden:

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'.

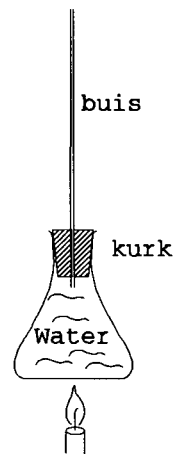


Figuur 9

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.

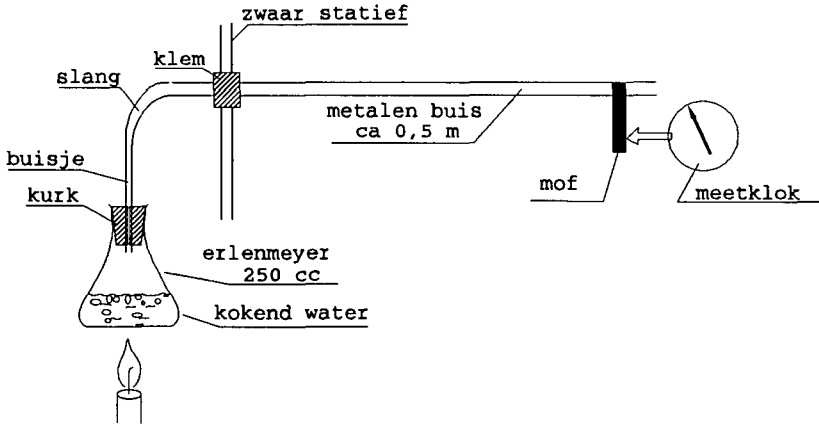
Proef 2. Uitzetting van water - de 'vloeistofthermometer'.

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	$\frac{1,38}{80} = 0,017$ mm

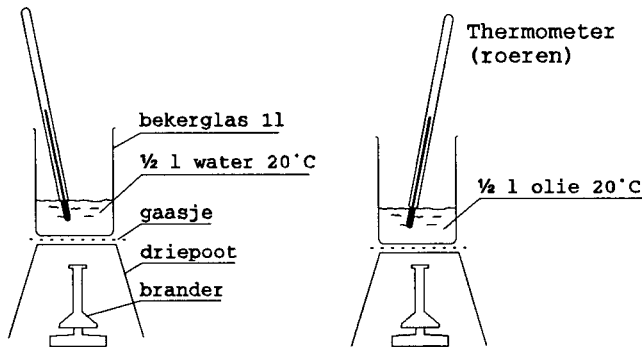
Een staaf van 10 m die 30°C wordt verhit zal dus $0,017 \times 10 \times 30 = 5,1$ mm uitzetten. Algemeen geldt: verlenging = uitzetting per graad per m lengte x temperatuursverschil x lengte.

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 bekglas 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</u> (minuten)	<u>temp. water</u> (°C)	<u>temp. olie</u> (°C)
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.

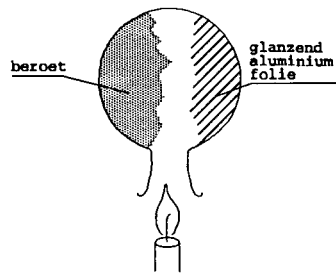
Proeven:

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.



Figuur 13

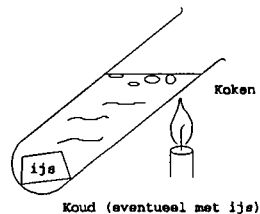
8. Ga na dat met een metalen spiegel de warmtestraling van richting te veranderen is. Doe hetzelfde eventueel ook met een doffe spiegel.
9. Concentreer de warmtestraling van bijvoorbeeld de zon met behulp van een holle spiegel of een bolle lens en ontsteek hiermee een lucifer.
10. Introduceer een thermoziuil (serie thermokoppels) als thermometer. Plaats voor een diaprojector een bak water en constateer met behulp van de thermoziuil 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.

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.
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).



Figuur 14

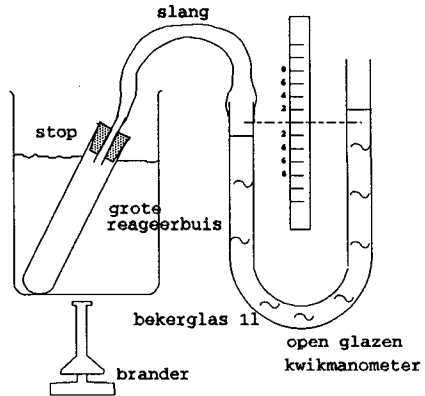
Vijfde voorbeeld van een waarnemingsreeks: Boyle/Gay Lussac

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:

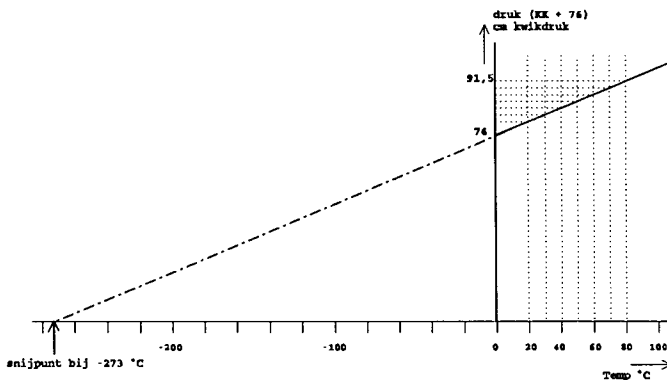
We meten steeds op dezelfde tijdstippen temperatuur en overdruk (in cm kwikkolom = cmkk).

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



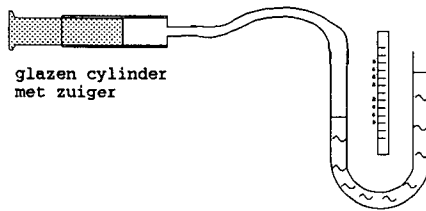
Figuur 15

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.



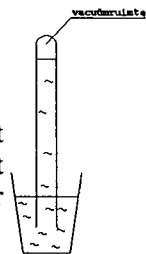
Figuur 17

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.



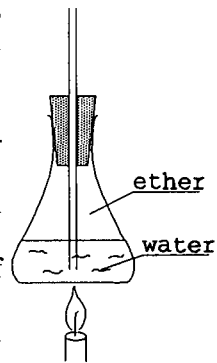
Figuur 18

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.

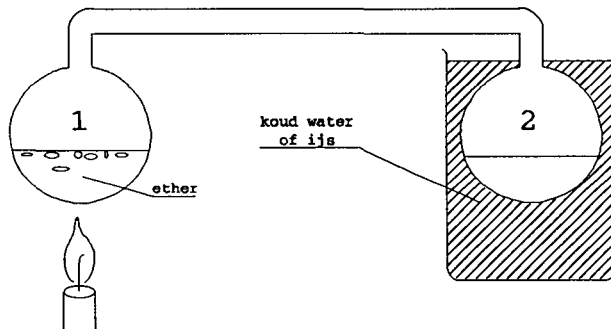
3. Er zijn vaste stoffen die zonder vloeibaar te worden verdampen zoals jodium, kamfer, een toiletblokje, maar ook ijs en sneeuw. De dampdruk van ijs bijvoorbeeld is 0,46 cmkk bij 0°C. Als de lucht maar droog genoeg is vriest een grasveld of straat schoon.



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

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).

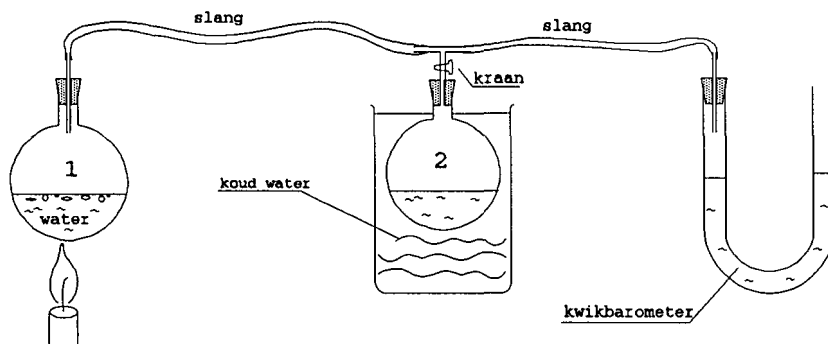
4. De dampspanning wordt bepaald door de laagste temperatuur in een ruimte (beginsel van Watt). De proef met de bollen van Watt (figuur 20) laat dit schitterend zien: in bol 1 verdampt ether en in bol 2 condenseert die weer.



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.

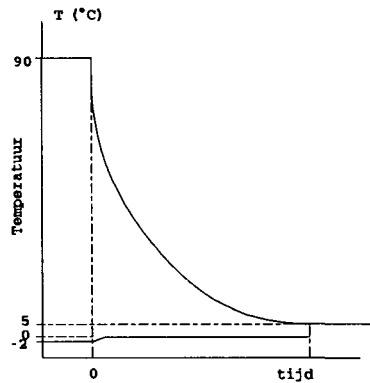
Zesde voorbeeld van een waarnemingsreeks: smelten en verdampen bij constante en veranderlijke druk

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.



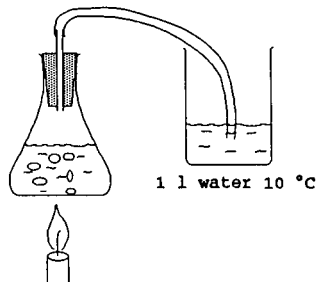
Zoals uit de grafiek blijkt zal het afkoelen van het water en het smelten van het ijs in het begin snel gaan. De temperatuurveranderingen zullen steeds langzamer verlopen, totdat uiteindelijk al het ijs gesmolten is.

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 verkoookt in de tijd dat het koude water van 10° tot 90° stijgt.

De berekening verloopt nu als volgt:

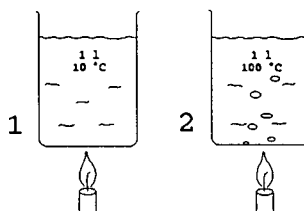
Stel dat 140 ml verdamp. Wanneer 1 liter = 1000 ml water verdamp kunnen daarmee $1000/140 \approx 7$ bekeerglazen van 1 liter, van 10° tot



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 bekeerglas 2 kookt, begint de proef.

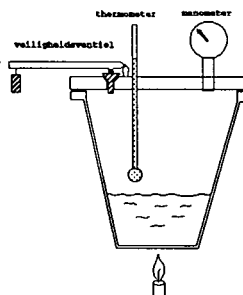


Stijgt de temperatuur van bekeerglas 1 van 10° tot 90°C, dan verdamt 140 ml water in bekeerglas 2. De berekening van de verdampingswarmte verloopt overeenkomstig het vorige voorbeeld.

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.

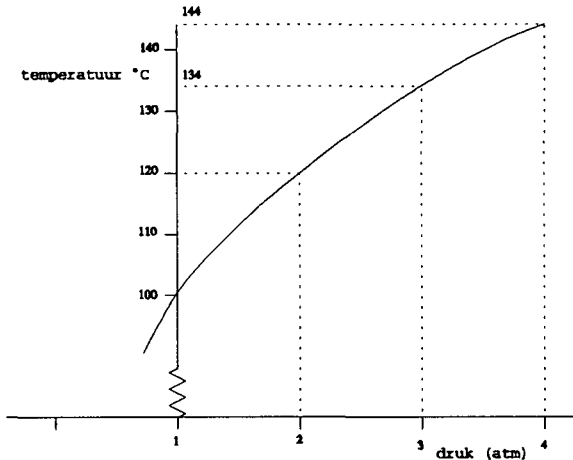
7. De stoompot van Papin. Met behulp hiervan wordt de kooktemperatuur in relatie tot de druk gemeten. Zie voor Papin's machine paragraaf 4.8.



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.

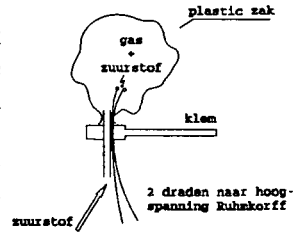
9. Doe fijngestampt ijs in een klein bekersglas en meet de temperatuur van het smeltende ijs. Voeg nu een ruime hoeveelheid zout toe en vermeng dit met het ijs. Het ijs smelt zeer snel, terwijl de temperatuur sterk daalt.
Aansluitend kan men het kookpunt bepalen van water met zout: 100 gram zout opgelost in één liter water geeft een kookpuntverhoging 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.

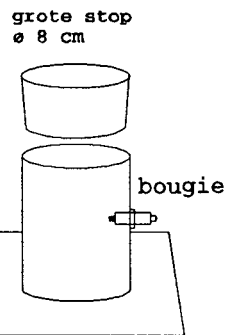
1. Verbrand in een schaalje of conservenblikje olie, petroleum, spiritus, ether en benzine. Benzine ontsteekt relatief moeilijk en geeft een smerige vlam. Door stevig in het vuur te blazen ontstaat veel warmte. Spiritus geeft ongeveer de helft aan warmte bij gelijk volume.
2. Leg een aantal glasplaten 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.

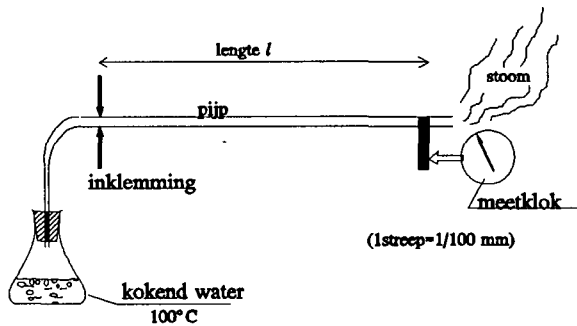
2. Warmte uitbreiding:
 - verschillende voorwerpen in kokend water
 - thermocolor
 - water in een reageerbuisje van boven laten koken (van onder blijft het koud).
3. Stroming:
 - groot bekersglas heel langzaam op één plaats verwarmen, stroming zichtbaar maken met kleurstof
 - stromingsbuis (c.v. principe 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 befrist.
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 eindtempertatuur 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.

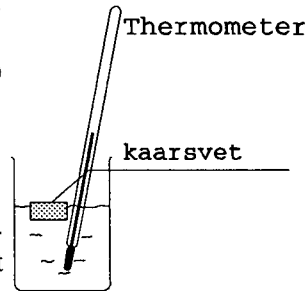
7. Meting van de uitzetting van een metalen pijp (holle pijp, stoom, meetklok).
Opstelling: Zie volgende pagina.

Bepaal door berekening de uitzetting per meter per graad.



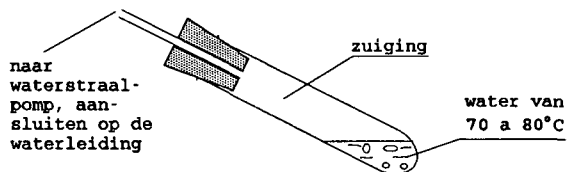
Figuur 29

8. Kaarsvet in water en het smeltpunt bepalen.
 Doe in een klein bekersglas (100 cm^3) water en een stukje kaarsvet.
 Opstelling:



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 begripmatig 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 nijd 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 kaarsveldamp. 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.

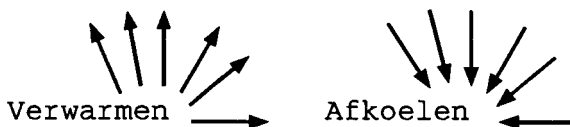
Met de voorgaande beschrijving zijn twee zaken expliciet naar voren gehaald:

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.

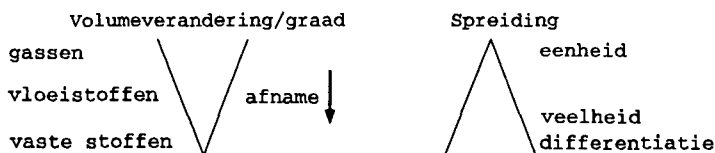
Tabel 1: Uitzetting van de stof in de verschillende fasen

	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 gassen	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 (Kelvin)	lineaire uitzetting promillage (%/°C)	volumetoename van 0 Kelvin tot smeltpunt	volumetoename bij het smelten
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

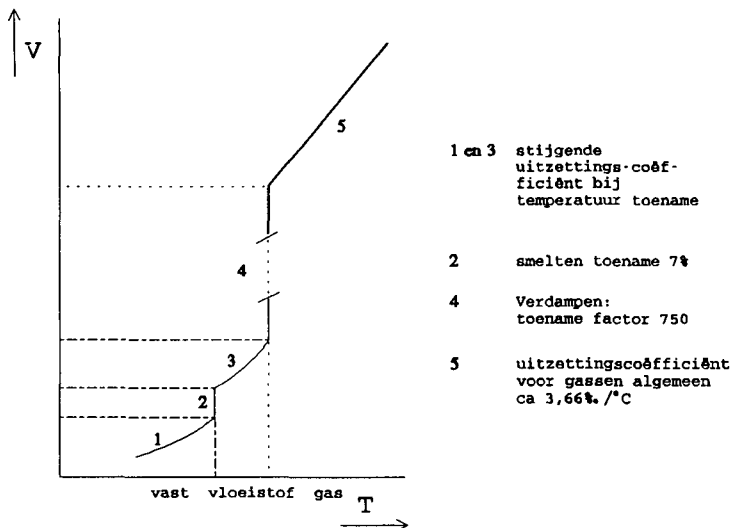
metalen. Verder is de volumetoename bij het smelten klein vergeleken bij die van de verdamping. Hieronder een overzicht voor enkele gassen:

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.

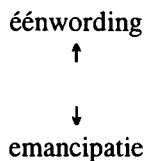
We vatten het hele beeld van de uitzetting van een stof samen in een V/T diagram, dat karakteristiek is voor vele stoffen:



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.



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 opwarmnelheid van de olie is 2,3 x groter dan van water. Daarmee is het begrip opwarmnelheid direct vanuit de proef gegeven:

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

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

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

De opwarmnelheid 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 opwarmnelheid van aluminium verloopt als volgt:

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

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

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:

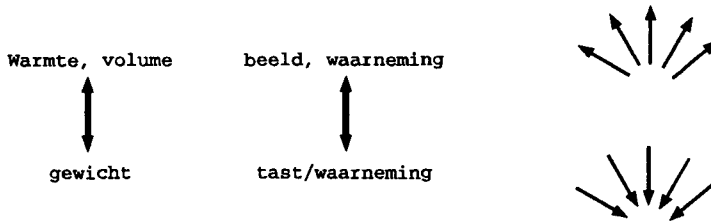
De hoeveelheid warmte die het blokje aluminium door vereffening afstaat (wegschenkt) is gelijk aan de hoeveelheid warmte die het water opneemt (ontvangt).

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 °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.

Temperatuur	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 opwarmingssnelheid 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 opwarmingssnelheid en warmtegetal. De opwarmingssnelheid geeft weer in welke mate de

Tabel 4: De opwarmingsnelheid in vergelijking met warmtegeleiding en uitzetting

	Opwarm- nelheid 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		
Waterdamp	3548	0,00028	0,026		
Waterstof	3248	0,00030	0,29		
Lucht	3240	0,00030	0,040	ca.17,4	3,66
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	-	-
IJs	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

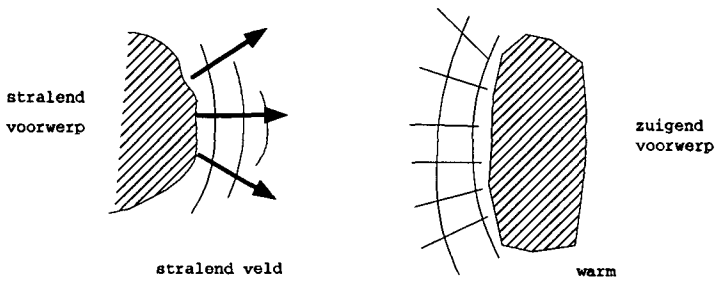
stof met de warmtetendens mee wil. De gassen zijn per volume-eenheid heel sterk met de warmte verbonden. De gassen laten de werking van de warmte heel goed zien: aan het gas kan men in *beeld* zien wat de warmte doet. Aan het warmtegetal wordt zichtbaar in hoeverre een stof 'zichzelf wil blijven', niet 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

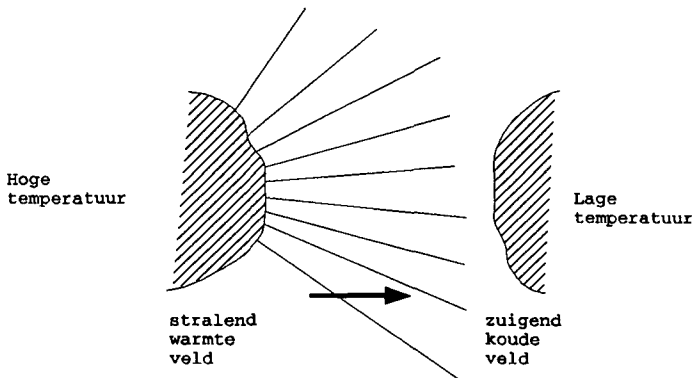
De proeven hierbij vindt men in paragraaf 4.3.3 derde voorbeeld (zie blz. 67 e.v.). Bij het verschijnsel warmtestraling kan men een onderscheid maken tussen bestraling -waardoor voorwerpen warm worden - en uitstraling - waardoor voorwerpen afkoelen. In 1860 stelde G. Kirchhoff: 'De verhouding tussen 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 vereffenvingsveld 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°C) 11,7 x zwakker straalde dan een witheet voorwerp (1200°C). L. Boltzmann interpreteerde dit in 1884 als volgt:

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

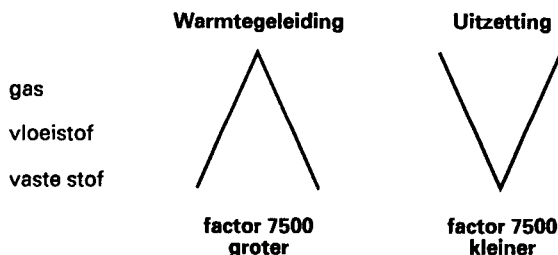
Bovenstaande berekening geeft weer dat de uitgestraalde hoeveelheid warmte (E) evenredig is met de temperatuur tot de vierde macht:

$$E \propto T^4.$$

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:

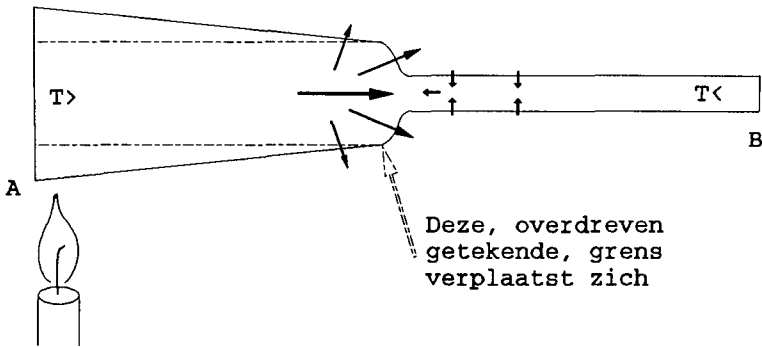


Figuur 38

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.

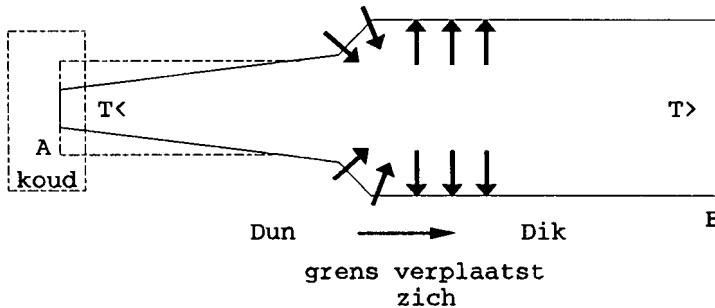
Wat normaal warmte'geleiding' genoemd wordt moet volgens deze zienswijze dus voorgesteld worden als een dynamisch proces van ontstaan en vergaan van warmte: Verwarmen A - uitzetting, dat wil zeggen het vergaan van de warmte in uiterlijke zin - B wil niet mee met de warmtesfeer en emancipeert zich ervan - 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 opwarmingsnelheid 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:

$$P_1 \times V_1 = P_2 \times V_2$$

$$P_1 \times V_1 = \text{constant}$$

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:

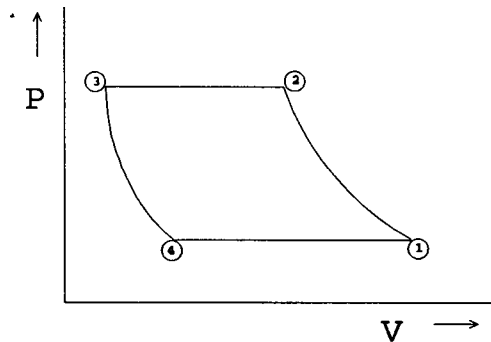
de volumeverhouding is evenredig met de temperatuurverhouding:

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

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: $V_1 = 2 \text{ l}$, $P_1 = 1 \text{ bar}$, $T = 20^\circ\text{C}$.

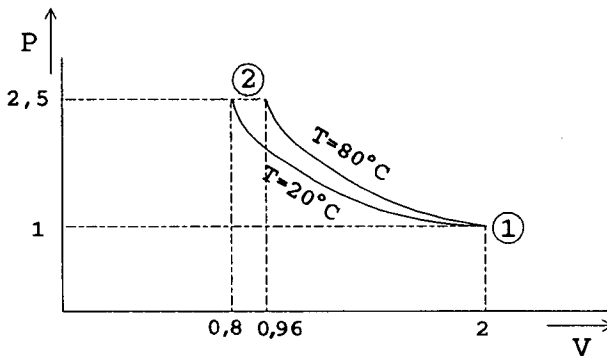
Door *langzaam* te persen zal de temperatuur niet stijgen. Is $P_2 = 2,5$ bar, dan kan V_2 berekend worden met $P \cdot V = C$

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

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:

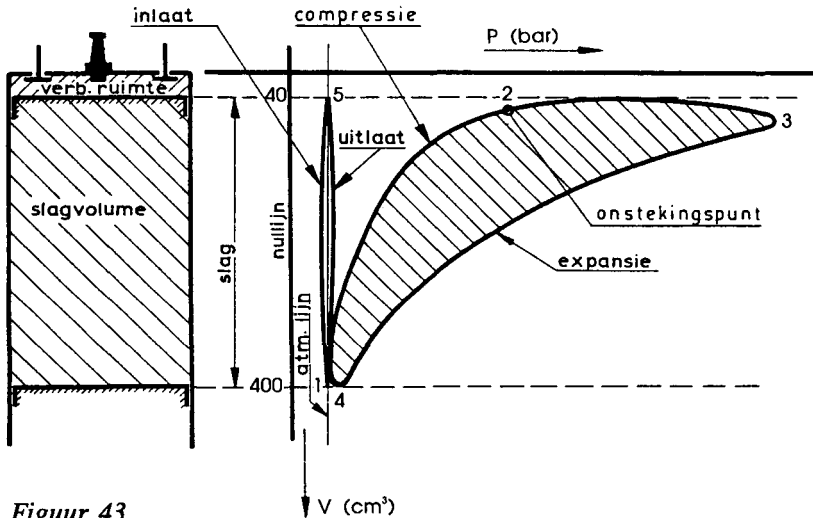
uitgestoten volume =

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

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.

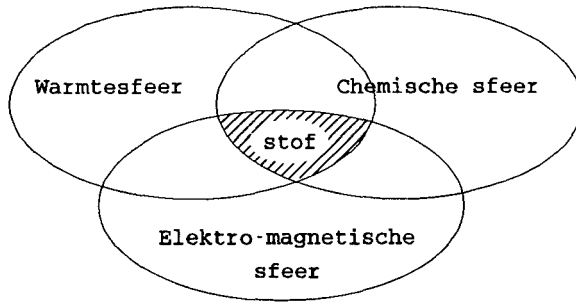
Berekeningen kunnen aan de hand van reëel gekozen getallen uitgevoerd worden:

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

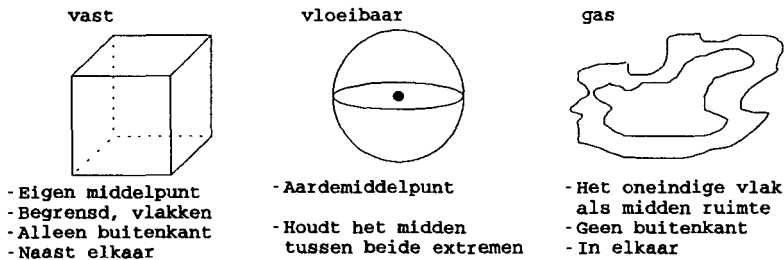
De proeven die bij dit onderwerp horen staan beschreven in paragraaf 4.3.2 vanaf de proef van Franklin (zie blz. 62 e.v.). Tijdens het smelten en verdampen vinden er hele grote veranderingen plaats onder inwerking van de warmte, de temperatuur verandert echter niet. Er verdwijnt zeer veel warmte in de 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 krachtensferen. Een ding is niet een op zichzelf staand iets, maar is uitdrukking van krachtensferen. 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.*

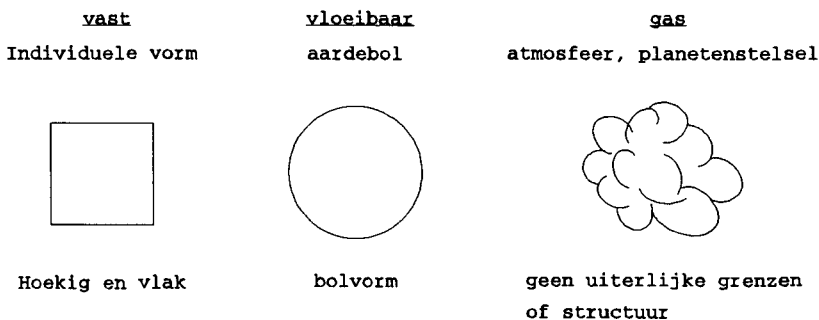
stof vloeibaar en wordt een meniscus gevormd. De viscositeit van de vloeistof wordt alsmaar kleiner en bij een bepaalde temperatuur verdampt de stof en gaat op in de ruimte. Bij toenemende temperatuur wordt het soortelijk volume van het gas en zijn viscositeit groter.

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

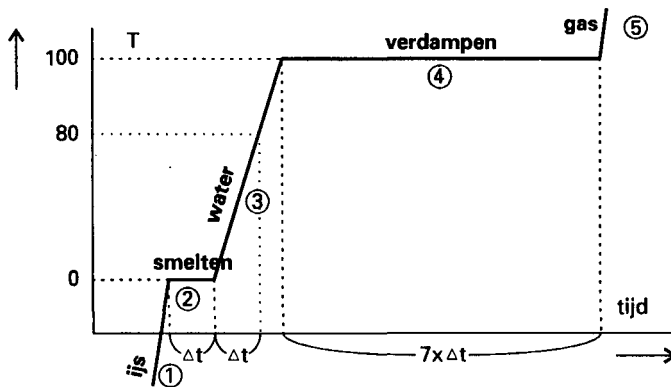
Bekijkt men nu hoe de warmte op de aggregaties werkt, dan is de vaste stof het meest onafhankelijk en de gassen zijn zo goed als één met de warmte. In beeld gebracht kan er dit als volgt uit zien (zie hiervoor ook paragraaf 4.9.5 over projectieve meetkunde):



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 meebelevén, 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 opwarmnelheid van ijs en stoom toe te voegen kan een tijd/temperatuurgrafiek gemaakt worden:

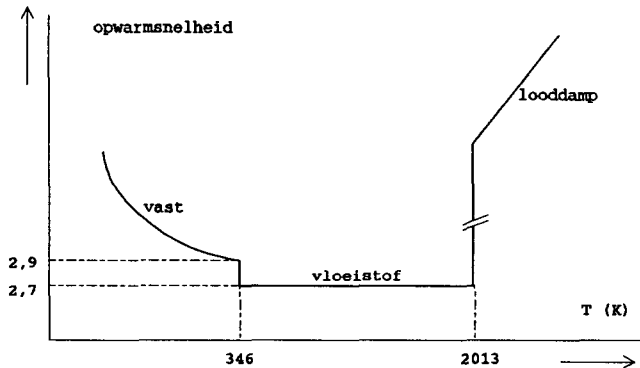


Figuur 48

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

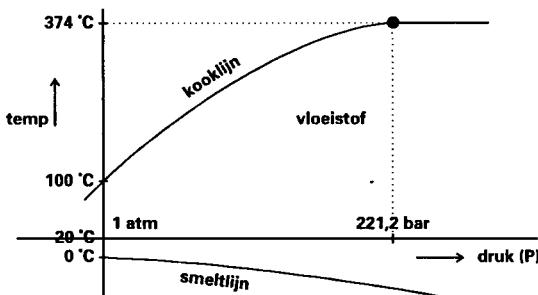
Uit de proef van Franklin, de pot van Papin, e.d. is gebleken dat bij toenemende druk het kookpunt hoger komt te liggen. De gasfase kan onder deze omstandigheden slechts bij hogere temperatuur gehandhaafd blijven. Bij afkoeling moet het gas eerder uit de warmtesfeer vallen door te condenseren tot vloeistof.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

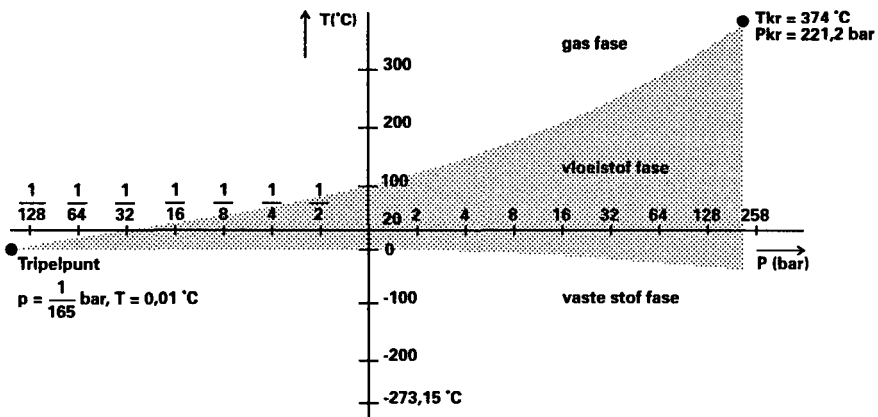


Figuur 50

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. Ligt 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.

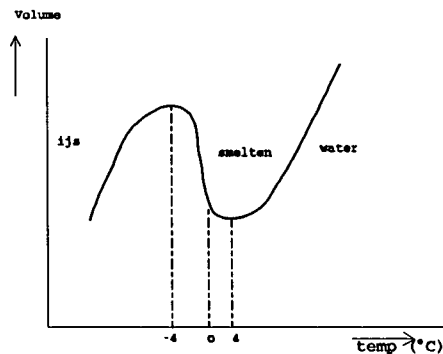
De universaliteit van water komt bijvoorbeeld te voorschijn in de atmosferische fenomenen zoals:*

‡	ijsvorming	-	transparant kristallijn
4	sneeuw	-	grote verscheidenheid van zeshoekvormen
♂	hagel	-	kracht, verwoesting
⊙	wolken	-	levendig vormenspel
♀	rijp	-	schoonheid
♀	regen	-	van vreugdevol tot striemende regenbuien
3	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 etherosol);
- 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. 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.



Figuur 52

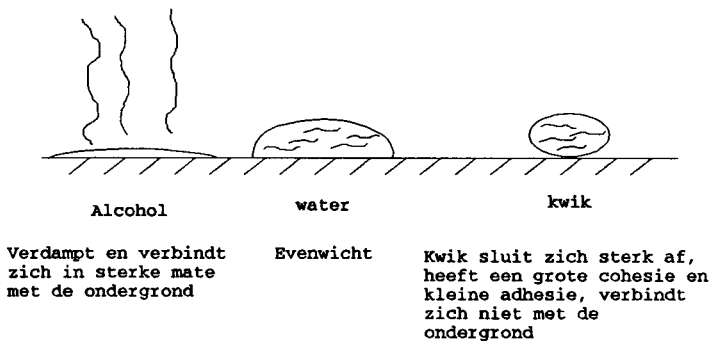
* De atmosferische fenomenen worden hier in verband gebracht met de planeten. Zie over het thema planeten en natuur o.m. *Metamorfose* van Frits Julius.

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 bevroerende water.

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

- Water staat tussen metalen en isolatoren. Metalen reflecteren radiostraling, 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 warmtehuishouding 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 tweemaal: er is een gerichtheid op het zwaartepunt en op de periferie. Het gas daarentegen - daarvan getuigen gasdruk en verspreidings-tendens - 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 oplozend 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 belevingswereld 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 Brienoordbrug 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 Brienoordbrug, 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: 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 golven?
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:

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

- 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.
- 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.
- 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.
- 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).
- 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%

$1 \text{ Watt} = 0,24 \text{ cal/sec}$.

$1 \text{ KWh} = 860000 \text{ cal}$

1 KWh kost $f 0,23$.

geiser: rendement 45%

1 m^3 aardgas kost $f 0,48$

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

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

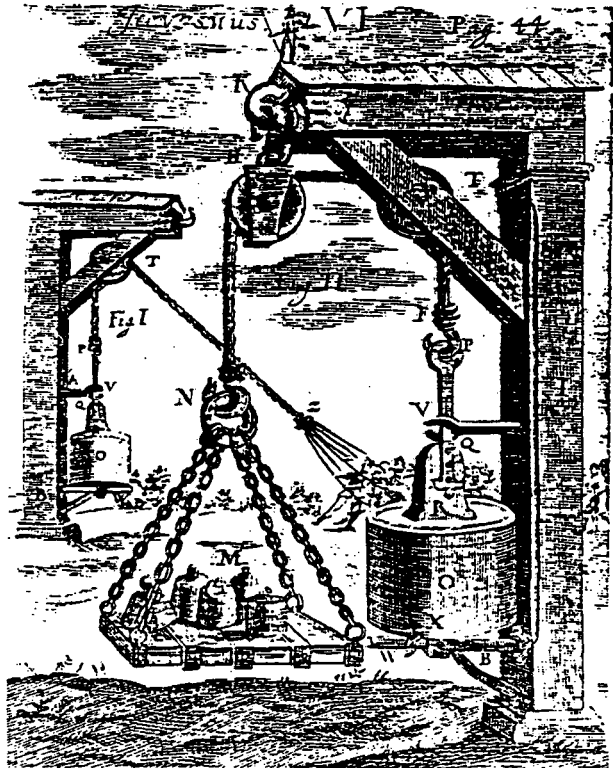
De stoommachine

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 eisernen 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.

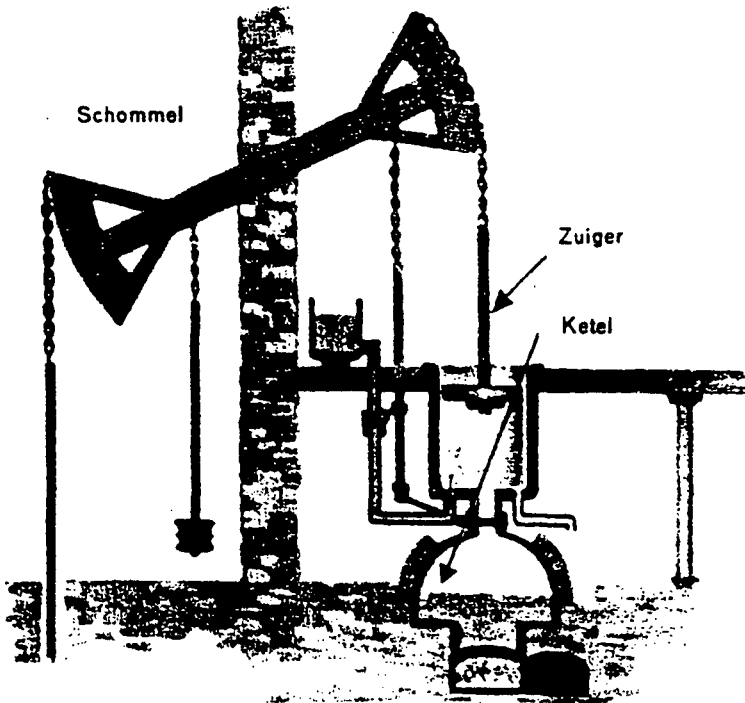


Figuur 54:
De pot van Papin

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.

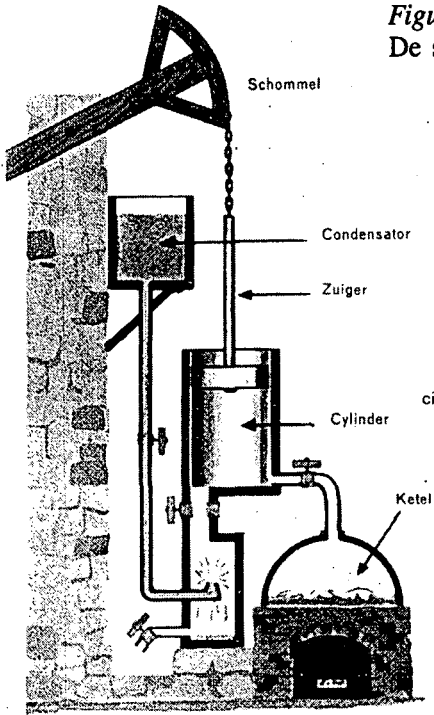
Pas in 1765 werd deze machine nogmaals verbeterd door J. Watt (1738-1819), die de stoom buiten de cilinder liet condenseren in een condensor. Tevens isoleerde hij de stoommachine, omdat hij ontdekte dat stoom een 1800 maal zo groot volume heeft als water en in staat is een 6 maal zo groot gewicht aan 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.

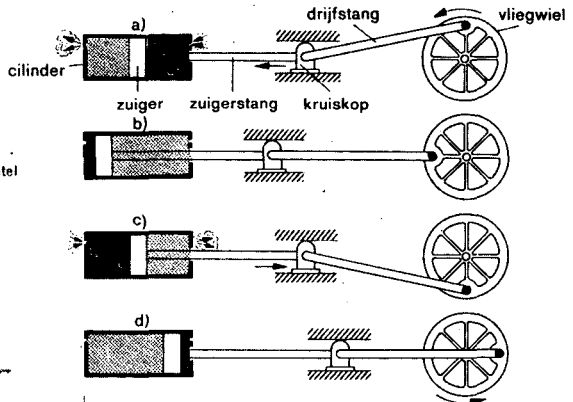
Watt was een geniaal man, die naast zijn wetenschappelijke vermogens ook gouden vingers had. Hij maakte instrumenten, zoals klokken, microscopen, violen, gitaren, orgels, balansen, kompassen, enz. Om de stoommachine een constant toerental te geven ontwikkelde hij het vliegwiel en de centrifugaal-reguleur. 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 Trevithick gebouwd. In 1829 haalde de trein van G. Stephenson 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 derailleurs bestaan nu nog steeds (patenten van rond 1905).

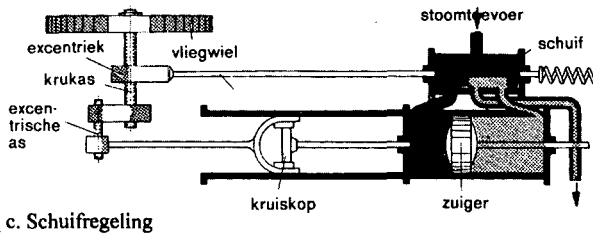
Figuur 56:
De stoommachines van James Watt.



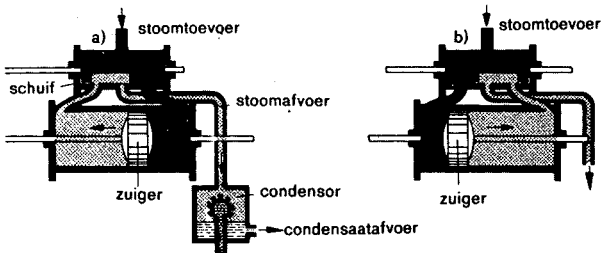
a. De verbeterde machine van Newcomen



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.

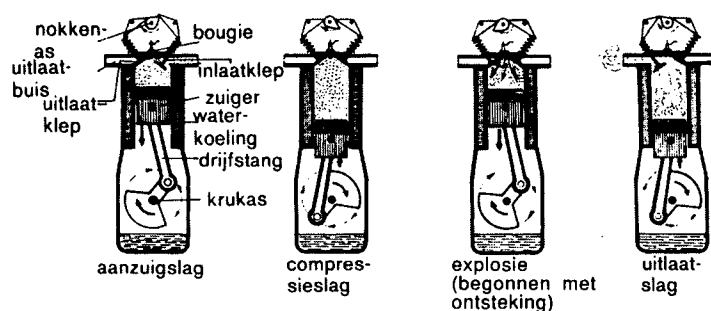
De dieselmotor, die in 1892 door R. Diesel ontwikkeld werd, had deze problemen niet. Deze motor werkt door zelfontbranding, is zuinig in het gebruik en stelt minder hoge eisen aan de brandstof. Dat de dieselmotor langzamer tot ontwikkeling is gekomen heeft naast technische vooral politieke redenen. Diesel 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

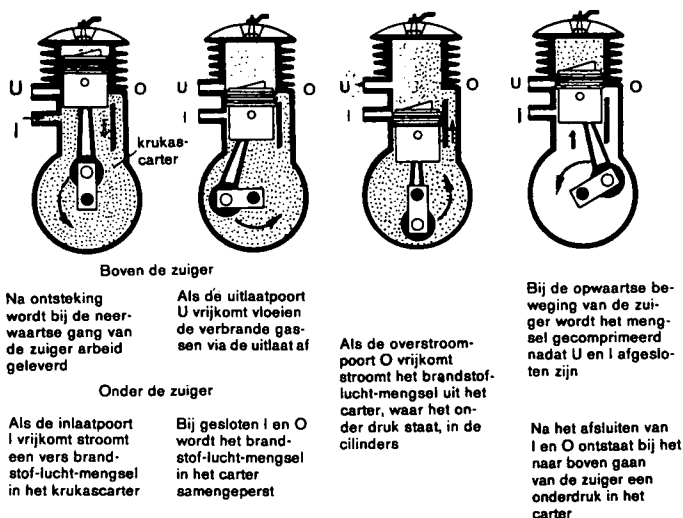
Het proces in iedere verbrandingsmotor verloopt als volgt:

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 gecompriemd, 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.

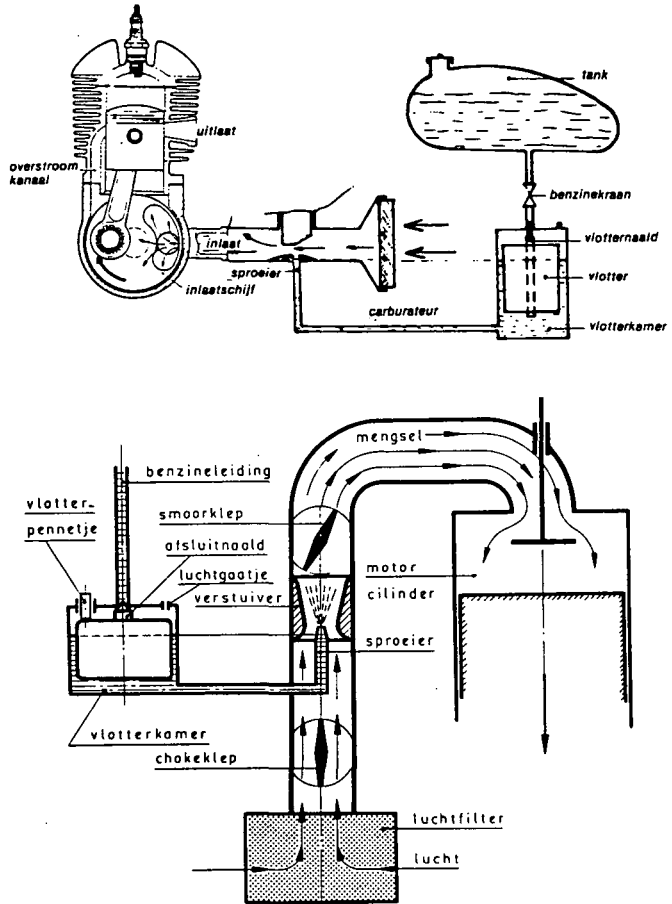
Werking van een viertaktmotor



Tweetakt-benzinemotor met krukastcompressie



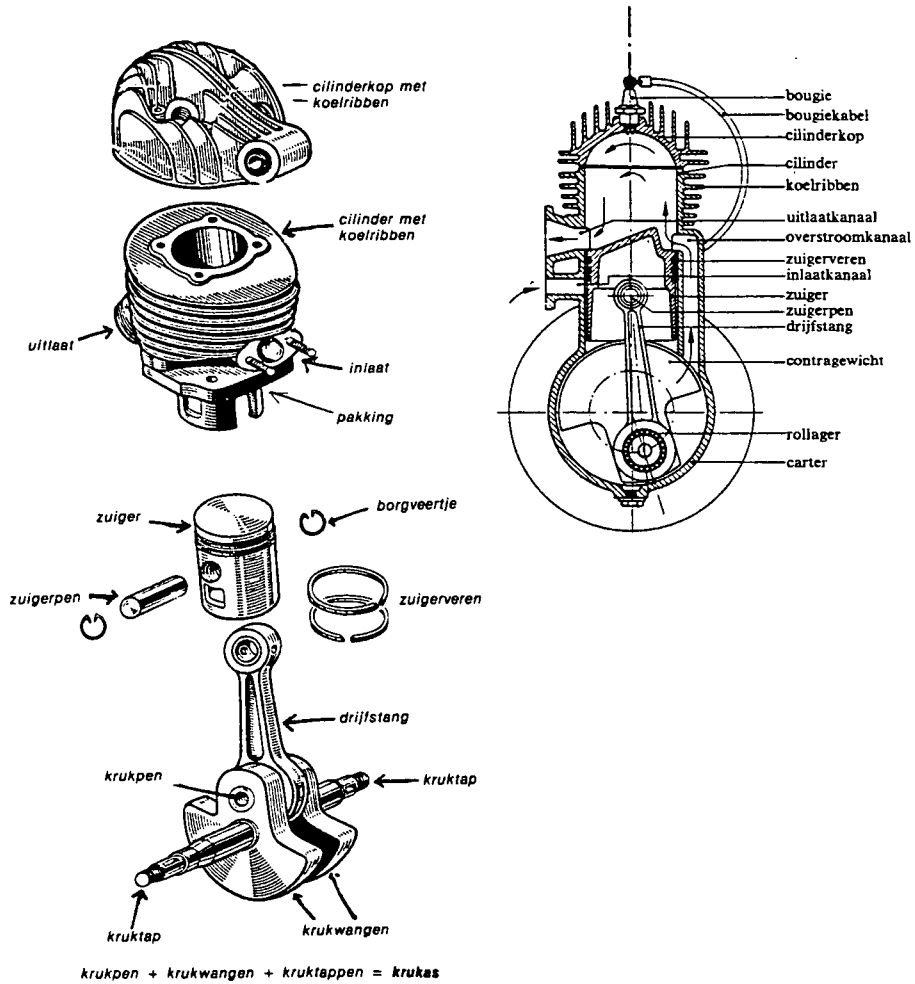
Figuur 58: De carburateur



Toelichting bij de figuur:

De sproeier en vlotterkamer zijn met elkaar verbonden. De benzine in de vlotterkamer staat bij stilstande 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

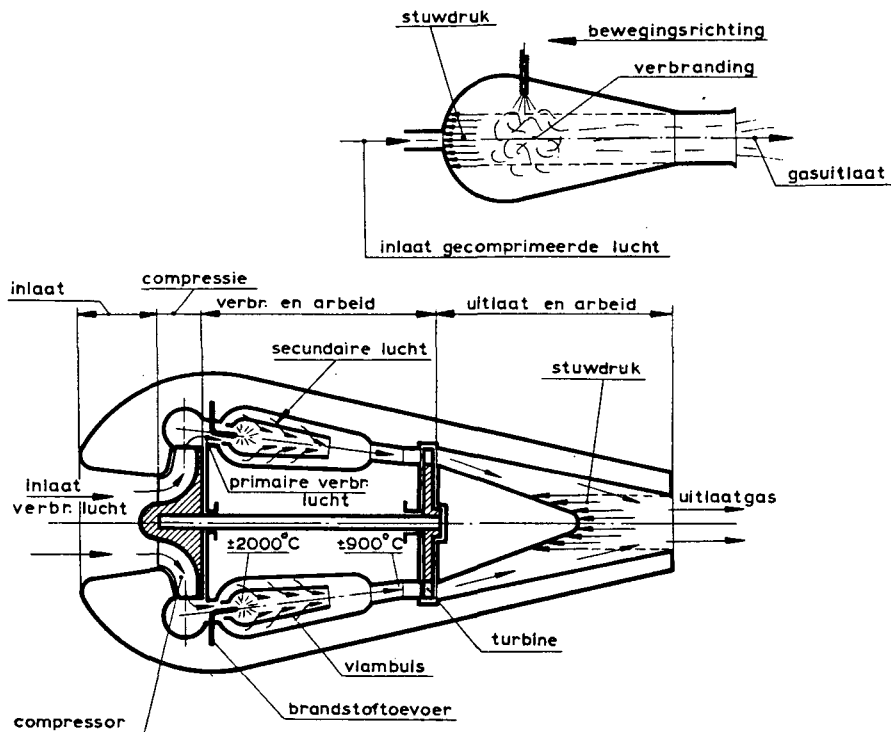


Bij de *meeste* motoren zit tussen de cilinderkop en de cilinder een pakking (koppakking).

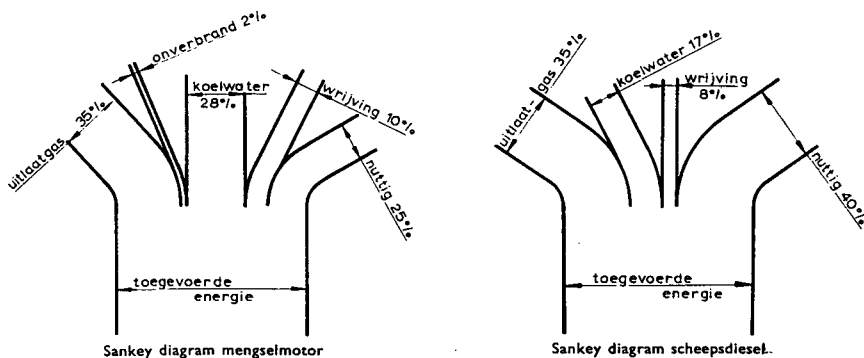
Aan de onderkant van de cilinder zit ook een dunne pakking (voetpakking).

Figuur 60: De straaljagermotor

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



Figuur 61: Rendement explosiemotoren

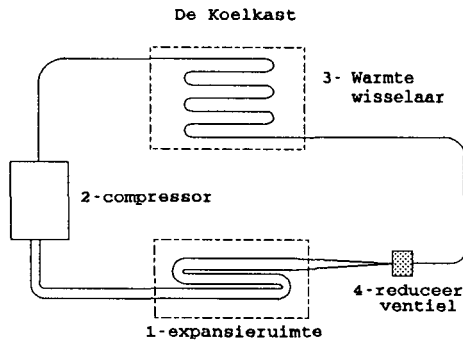


Bij de benzinemotor speelt de verhouding benzine-lucht een belangrijke rol en moet binnen nauwe grenzen afgesteld kunnen worden. In de carburateur wordt de benzine verdampt en vermengd met lucht. Hier kan de venturi besproken worden: lucht stroomt door een plaatselijke vernauwing, waar ook de benzine 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 passende trein en het vliegtuigvleugelprofiel kunnen hier worden aangehaald). Zie figuur 58.

In 1930 werden 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.

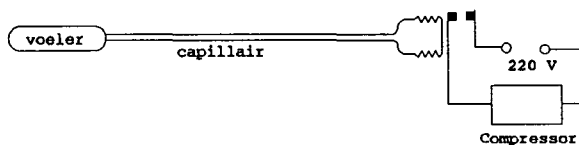


Figuur 62

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-essentiëleste, 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

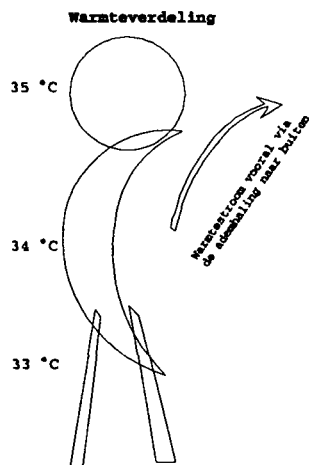
Het 'ik' en de warmteprocessen zijn bij de mens zeer nauw met elkaar verbonden. Het menselijk lichaam zou een machine zijn wanneer er geen warmte was. In en door de warmte leeft het geestwezen (ik) van de mens.

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 natuurrhythme. 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.

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



Figuur 64

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.

Spielen 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

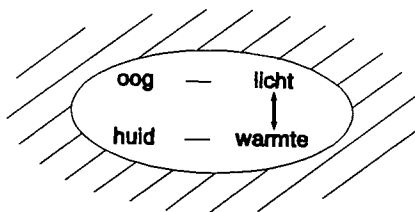
De warmte moet nu gedacht worden tussen de imponderabele, centrifugaal gerichte krachten en de ponderabele, naar het centrum gerichte krachten. Steiner beschrijft het warmtewezen als zich openbarend op het grensvlak van het ruimtelijke en het onruimtelijke. Het warmtewezen wordt nooit helemaal afgesnoerde 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

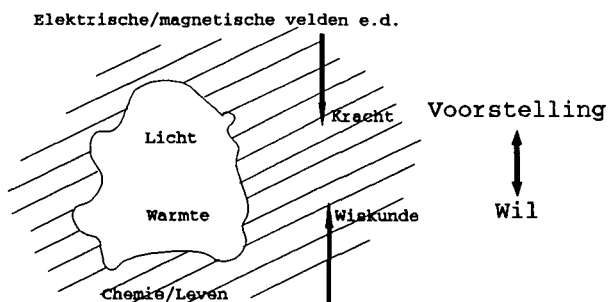
Het oog wordt het meest van alle zintuigen vergeleken met een apparaat: de camera. Het bolle oog boven in het hoofd, omgeven door stevige beenderen, is een soort venstertje, waardoor de mens vanuit zijn

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 kleurverschijnenselen 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 warmteverschijnselen 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 zonnfase 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: $\left. \begin{array}{l} \text{warmte} \\ \text{elektrische spanning} \end{array} \right\}$

- 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.

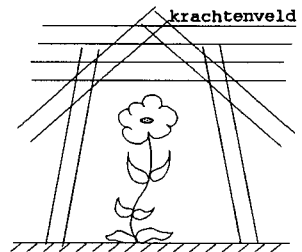
1. Zoals twee lijnen die door één punt gaan altijd één vlak bepalen (hun verbindingsvlak), zo bepalen twee lijnen die in één vlak liggen altijd één punt (hun snijpunt). Soms ligt dit snijpunt in het eindige, soms oneindig ver weg. In de euclidische meetkunde spreken we in het eerste geval van snijdende 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

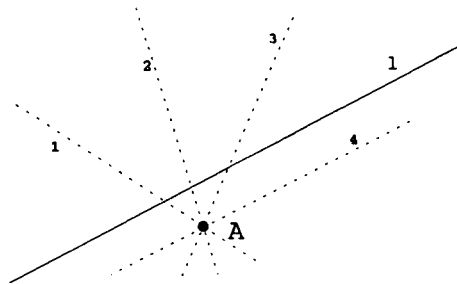
Krachtenvelden hoeven niet alleen zintuiglijke waarnemingen begripmatig toegankelijk te maken, zoals bij licht, warmte, elektro/magnetische velden en dergelijke, maar kunnen ook 'denkend-waarneembaar' zijn, zoals de morfogenetische velden van Sheldrake. Het denken voert de mens niet tot lege communicatiebegrippen,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

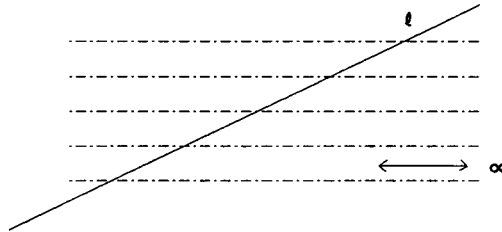
Iedere lijn van lijnenwaaier A zal l snijden in een punt. A_4 en l zijn evenwijdig en snijden elkaar dus in een oneindig ver gelegen punt. Omdat men in de lijnenwaaier zowel linksom als rechtsom tot A_4 kan komen, kan men het oneindig verre snijpunt van A_4 en l zowel linksom als rechtsom benaderen. 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 uitgangspplaats 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

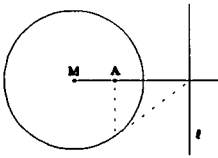
Alle lijnen van lijnenwaaier B (die onderling evenwijdig zijn omdat ze elkaar snijden in een oneindig ver punt) hebben een snijpunt met de lijn l . Ook het oneindig verre punt Q_∞ van l moet zo'n snijpunt zijn. Q_∞ kan alleen het snijpunt zijn van l en de oneindig verre lijn van het vlak waarin B ligt.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

1. Isoleer in één vlak een eenheidscirkel.

1. Isoleer in de ruimte een bol met straal 1.



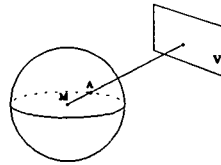
Figuur 70

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 gelege 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.

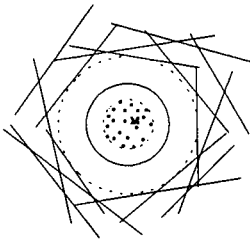
Alle punten binnen de bol vormen de *kern*, terwijl alle toegevoegde vlakken tezamen de *omhullende* vormen. Als centrum van de kern geldt het midden M van de bol, terwijl het grensvlak het centrum van de omhullende is.

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

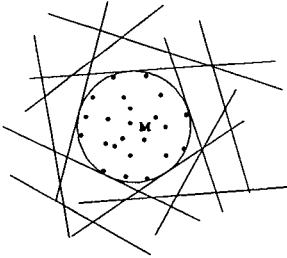
voegde vlak van het grensvlak naar de bol toe bewegen. Is het punt op het boloppervlak aangekomen, dan raakt het polair toegevoegde vlak de bol in dit punt. Alle kernpunten op de bolrand hebben als bijbehorende omhullende de verzameling van vlakken die de bol raken. Verlaat een punt de binnenruimte van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

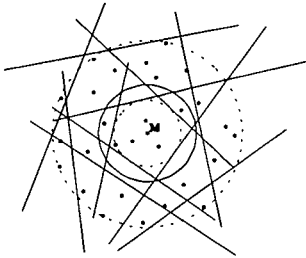
b. $r=1$. Kern en omhullende raken elkaar op de cirkelrand.



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 bewegend, de kern naar buiten, de omhullende naar binnen.



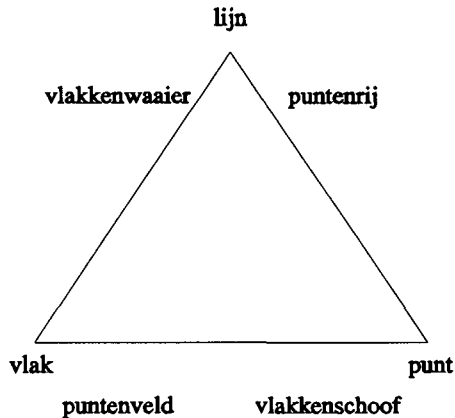
Figuur 74

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*.

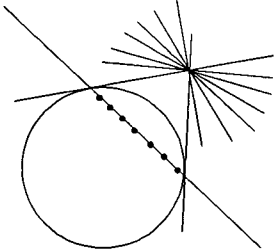
Uit deze en andere voorbeelden blijkt opnieuw, dat punt en vlak in de ruimte tegengestelde of polaire elementen zijn en de lijn een verbindende middenschakel vormt. Ook tussen uit meerdere elementen samengestelde figuren als vlakkenwaaier en puntenrij blijkt deze polariteit te bestaan. Het polariteitsprincipe 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

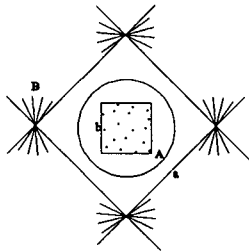
Het overzicht is geenszins compleet, alleen die elementen die nodig zijn voor het vervolg zijn opgenomen. Ter toelichting: een puntenveld is een verzameling punten, die gezamenlijk een vlak vormen; een vlakkenschoof is een verzameling vlakken, die allen door één punt gaan. Ook puntenveld en vlakkenschoof 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 begrensde 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).

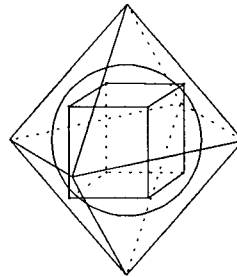
Vlakkenwaaier (alle vlakken door een lijn).

- 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 meep proces 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 $V_2 = lbh (1 + \alpha \Delta T)^3$

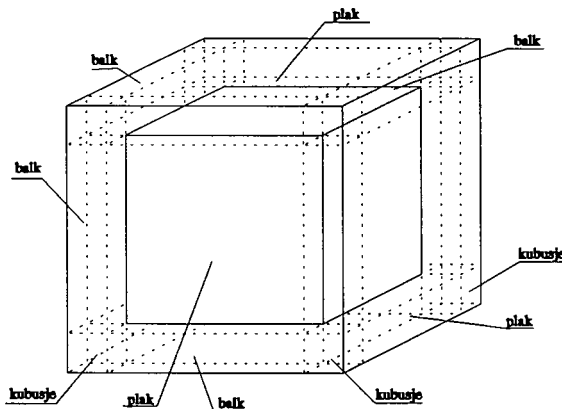
ofwel $V_2 = lbh (1 + 3\alpha\Delta T + 3\alpha^2\Delta T^2 + 3\alpha^3\Delta T^3)$
 ruimtelijk: grote kubus 3 plakken 3 balken 1 kleine kubus

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

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

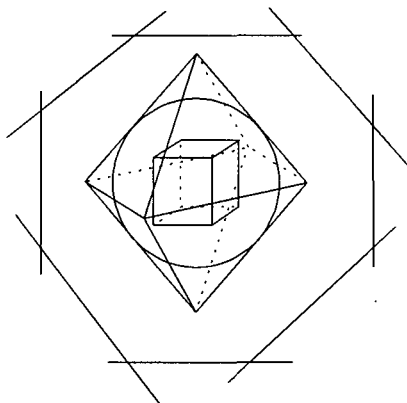
kan men bewijzen dat voor het uitgezette volume geldt:

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



Figuur 78

Door nu de warmtesfeer als krachtensfeer 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 verloopende 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 gastermometer.

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' verruimt. 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 grootheidswaanin 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:

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

$$R = K \cdot N_A$$

n = aantal mol K = constante van Boltzmann $1.38 \cdot 10^{-23}$ J/K
 R = universele gas- N_A = getal van Avogadro = $6,022 \cdot 10^{23}$ /mol
 constante =
 8,314 J/K mol

Het grafscript van Ludwig Boltzmann $S = K \cdot \ln W$ 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 *afpraak* 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.