

## "Hoe WARM het was en hoe ver ....."

Op weg naar warmte als thermodynamisch begrip in 5-VWO?

K.J. Terpstra,  
Zeldenrustcollege, Terneuzen<sup>1</sup>  
H.F. van Sprang en A.H. Verdonk,  
Vakgroep Chemiedidactiek  
Rijksuniversiteit te Utrecht

### Summary

*A study was made involving a small group of 17 year old students, all of whom had been taught about 'temperature', 'heat' and 'energy' in physics lessons at school in previous years. The students worked at a series of small tasks intended to learn them to distinguish between 'heat' and 'energy' as thermodynamic concepts. The research showed this wasn't achieved. Nearly all the students still experienced 'heat' as something determining the temperature of a body in some way. Further research is therefore needed into a concept genesis of 'heat' and 'energy' as two different notions. The suggestion was made that it might be helpful to include an electrochemical cell and electric work in the discussion about the first law of thermodynamics combined with the 'direct' way of the same chemical reaction.*

### 1. Inleiding

Reeds vanaf 1978 probeerde ik<sup>1</sup> als scheikundeleraar in 5-vwo-classes de in het nieuwe leerplan rijksscholen (1984) genoemde begrippen "enthalpie" en "entropie" op een voor leerlingen begrijpelijke wijze te introduceren. Ik raakte daarbij zelf steeds meer geïnteresseerd in het betreffende stukje chemische thermodynamica, maar slaagde er niet in deze interesse over te brengen op mijn leerlingen, een enkeling daargelaten. De meesten vonden dit onderwerp bijzonder moeilijk en waren blij als ze de trucjes van de bijbehorende vraagstukken beheersten.

Artikelen in Faraday (Brants, 1976; Smith, 1977; Brants, 1981; De Vos, 1981) hielpen mij niet verder bij het beschrijven van problemen omtrent enthalpie en entropie in mijn onderwijssituat-

ties, en zeker niet bij het oplossen ervan. Toen zich dan ook de mogelijkheid voordeed in het kader van mijn doctoraalexamen chemiedidactisch onderzoek te doen aan die problemen bij mijn eigen leerlingen, heb ik deze gelegenheid met beide handen aangegrepen.

Dit onderzoek spitste zich al snel toe op de term 'warmte'. Alleen al vanwege de omvang van de te verrichten werkzaamheden werd 'entropie' verder buiten beschouwing gelaten. 'Warmte' is in het dagelijkse spraakgebruik een diffuus begrip, niet duidelijk afgegrensd van 'temperatuur' ("een behaaglijke warmte"). Met 'warm' wordt vaak een temperatuurgebied bedoeld, met daarnaast 'koud', 'lauw' en 'heet'. Vegting (1977) heeft erop gewezen dat in de alledaagse taal naast 'warmte' ook 'kou(de)' wordt gebruikt. Zij constateerde in twee gesprekjes met oudleerlingen dat "er niets in het wereldbeeld van deze leerlingen veranderd is, terwijl zij het hele warmteconcept inclusief moleculaire verklaring gehad hebben".

De term 'warmte' speelt ook een rol in zeer uiteenlopende stadia van onderwijs in school- en studievakken als natuurkunde, scheikunde, biologie en aardrijkskunde. In het bijzonder willen we hier wijzen op een gebruikelijke, fysische, corpusculaire beschouwingswijze waarin 'warmtetoevoer' aan een lichaam wordt gekoppeld, zij het niet exclusief, aan een toename van de kinetische en potentiële energie van zijn moleculen.

In de thermodynamica is warmte een fundamenteel begrip met een langzamerhand nauwkeurig vastgelegde 'inhoud': *energietransport tussen twee lichamen onder invloed van een temperatuurverschil* (bijv. Bijvoet, Peerdeman, Schuijff & Wiebenga, 1973; Tripp, 1976). Warmte heeft hier de toegespitste betekenis van 'vorm van energietransport'. In het dagelijks leven heeft warmte echter ook vaak de betekenis van een voorwerpseigenschap (de "warmte" van de koffie in een thermoskan).

Koning (1948, p. 77) beschrijft in zijn dissertatie een onderzoek van Black (1926). Deze liet leerlingen een opstel maken over het onderwerp: "What I think Heat is, and other things I know about Heat". Leerlingen ( $\pm$  15 jaar) die nog geen natuurkundeonderwijs hadden gehad, gaven als meest voorkomende 'definities' van 'heat': 1. substitutie door een synoniem ("warmth"); 2. 'heat' is een eigenschap van het vuur, een brandend voorwerp of de zon; 3. 'heat' is een soort stof; 4. 'heat' is de temperatuur van een ding. Iets oudere leerlingen, die reeds één

of twee jaar natuurkunde hadden gehad, gaven deze definities niet meer, maar herleidden het begrip 'warmte' tot een beweging van de moleculen of een vorm van energie. Konings eigen onderzoek (1948, p. 77) bevestigde deze resultaten, "alleen waren er veel meer leerlingen, die ogenschijnlijk warmte en temperatuur aan elkaar gelijk stelden".

Gedurende het laatste decennium wordt regelmatig gesproken over "misconceptions" (misvattingen) als leerlingen zich van hetgeen in de natuur gebeurt een andere voorstelling vormen (hebben gevormd) dan de huidige natuurwetenschappelijke zienswijze. De benoeming 'misvatting' impliceert de 'juistheid' van bepaalde gezichtspunten die door de betreffende leerlingen niet worden gedeeld. Vegting (1988) trekt ons inziens daarom terecht de 'juistheid' van de term 'misconceptie' in twijfel.

Summers (1983) geeft een overzicht van enige literatuur aangaande misvattingen bij leerlingen inzake 'warmte', en komt tot de aanbeveling 'warmte' als zelfstandig naamwoord te vermijden en zoveel mogelijk te vervangen door 'verwarmen' als benoeming van een proces. Se-yuen Mak en Young (1987) wijzen in hun beschouwing over hetzelfde onderwerp Summers' voorstel af en zien als remedie tegen de misvattingen het benadrukken van het verschil tussen een toestand(sfunctie) en een proces. Beide studies berusten niet op empirisch onderzoek.

Erickson en Tiberghien (1985) doen verslag van onderzoek waarbij leerlingen betrokken zijn. Erickson geeft een overzicht van ideeën over temperatuur en warmte waarvan kinderen blijk geven die in leeftijd variëren van 4 tot 16; de 'definities' 2, 3 en 4 van Black zijn hierin terug te vinden. Tiberghien beschrijft hoe Franse kinderen tussen 10 en 14 hun verklaringen van verschijnselen inzake warmte en temperatuur veranderen onder invloed van het gevolgde onderwijs. De beschreven vraagstellingen zijn echter zo typisch natuurkundig, in de schoolvakbetekenis van het woord, dat wij er bij onze problematiek niet rechtstreeks ons voordeel mee kunnen doen.

Onderzoek naar uitspraken van leerlingen in onderwijssituaties vergelijkbaar met 5-v.w.o.-scheikundelessen over 'warmte', 'energie' en 'enthalpie' is ons niet bekend. Dit was mede een reden voor het verrichten van het hierna beschreven onderzoek. In dit artikel ligt de nadruk vrijwel geheel op de term 'warmte', omdat tijdens het onderzoek steeds duidelijker werd hoe belangrijk de thermodynamische betekenis hiervan is bij een introduc-

tie van de term 'enthalpie' zoals Van Sprang, Van Roon & Verdonk (1988) onlangs beklemtoonden. En juist deze thermodynamische betekenis van warmte blijkt voor leerlingen (en niet slechts voor hen) veel begripsproblemen op te leveren. Aangezien 'enthalpie' echter in het leerplan staat, moet het worden onderwezen. Daarom leek het ons wenselijk te onderzoeken of leerlingen in een beperkte tijd aanspreekbaar kunnen worden gemaakt voor een thermodynamisch begrip 'warmte'. Pas als dit bereikt is, is ons inziens voor hen een onderscheidend gebruik van 'warmte', 'energie' en 'enthalpie' mogelijk.

Voor het verband tussen dit drietal in een thermodynamische context te onderscheiden begrippen - en 'enthalpie' hoort in die context thuis - verwijzen we naar Van Sprang, Van Roon & Verdonk (1988). In §2 komt kort het onderzoeksmateriaal ter sprake. Daarna volgt de beschrijving van enkele onderzoeksresultaten inzake 'warmte' (§3) en inzake 'energie' (§4), en tenslotte een samenvatting en conclusies (§5).

## 2. Leerlingentekst en onderzoeksmateriaal

Mijn onderzoek begon met het analyseren van de tekst van het scheikundeboek "Chemie" (1985) inzake begrippen die een rol spelen bij de invoering van 'enthalpie' en van 'entropie'. Daarnaast bestudeerde ik het thermodynamica-gedeelte van het eerstejaarsdictaat fysische chemie van de RUU (Van Sprang, 1984). Vervolgens stelde ik een vragenlijst op om na te gaan hoe mijn 5-vwo-leerlingen vooral de termen 'temperatuur' en 'warmte', maar ook 'druk', 'spontane reactie', 'omkeerbare reactie' en 'evenwicht' gebruiken. Deze vragenlijst werd door de leerlingen in groepjes van 3 à 4 besproken en schriftelijk beantwoord. Van de gesprekken van enkele groepjes maakte ik bandopnamen.

Analyse van de antwoorden en van de uitgeschreven gesprekken maakte mij duidelijk dat zeker 'warmte' nog geen probleemloos begrip is als het geacht wordt te functioneren in een fysische of chemische context.

Op basis van dit onderzoekje, van de genoemde analyse van leerboekteksten en van het thermodynamica-dictaat ontwierp ik een leerlingentekst<sup>2</sup>, getiteld "Energie", bedoeld voor groepswork. Dit geschiedde in intensief overleg met enkele leden van de vakgroep chemiedidaktiek. Deze tekst bevat de volgende paragrafen: 1. Temperatuur en warmte; 2. Systemen en hun omgeving; 3. Energie; 4. Arbeid; 5. Enthalpie.

Tien groepjes van 3 à 4 (totaal 37) leerlingen hebben met die tekst gewerkt. Van elke opdracht kreeg ik van ieder groepje een schriftelijk verslag. Iedere les maakte ik verder van twee groepjes een bandopname van de gevoerde gesprekken. Ik koos telkens andere groepjes omdat ik in dit stadium van onderzoek inventariserend te werk wilde gaan.

De uitgeschreven gesprekken (protocollen) en de groepsverslagen vormen samen het onderzoeksmateriaal.

### **3. Enkele onderzoeksresultaten inzake 'warmte'**

Van Sprang, Van Roon & Verdonk (1988) maakten bij de chemisch thermodynamische beschrijving van een verandering van een systeem onderscheid tussen enerzijds toestandsgrootheden als 'energie' en 'enthalpie', en anderzijds de procesgrootheden 'warmte' en 'arbeid'. In die context wordt met 'warmte' een energietransport over de systeemgrenzen aangeduid dat optreedt als gevolg van een temperatuurverschil tussen systeem en omgeving. Als 'warmte' vanuit de omgeving naar het systeem gaat, wordt het systeem niet rijker aan warmte, maar aan energie. De term 'warmte' heeft in dit geval een heel andere betekenis dan in de dagelijks-leven-uitspraak: "Een goede thermosfles staat zijn warmte maar heel langzaam af", of in de schoolchemie-uitspraak: "Als magnesium met zoutzuur reageert, komt naast waterstof ook warmte vrij waardoor de temperatuur van de oplossing stijgt".

In "Energie" heb ik geprobeerd een reeks opdrachten te construeren die het leerlingen mogelijk zou kunnen maken geleidelijk een opvatting van 'warmte' als energietransport ten gevolge van een temperatuurverschil te verwerven. In het licht van de vraag: "Hoe gaan mijn leerlingen om met de term 'warmte' bij hun beantwoording van enkele opdrachten?", beschrijf ik in deze paragraaf enige resultaten van mijn onderzoek.

#### *3.1 Afsgifte van warmte*

Volgens opdracht 1.7 van "Energie" moet een groepje leerlingen een reageerbuis gevuld met wat stearinezuur en een ongeveer even volle met water au bain-marie op minstens 95 °C brengen. In beide reageerbuizen bevindt zich een thermometer. Nadat de twee buizen tegelijk uit het hete water zijn gehaald, koelen ze aan de lucht af. Om de halve minuut leest het groepje de ther-

mometers af en construeert tenslotte met behulp van de verkregen gegevens twee 'afkoelcurves'.

Enige gedeelten uit het protocol van de bandopname van een groepsdiscussie over de bij dit experiment gestelde vragen (opdracht 1.8) volgen hieronder. Daarbij zijn J, M en S de eerste letters van de gefingeerde namen van de groepsleden. Hun uitspraken zijn in het volledige protocol doorlopend genummerd. In mijn bespreking van de protocolfragmenten laat ik bij verwijzen het woord "uitspraak" meestal weg.

De vragen 1.8 a en b luiden:

- "a) Waardoor daalt de temperatuur in de reageerbuisen?  
b) Stel dat de reageerbuisen, nadat ze uit het kokende water zijn gehaald, in een bekersglasje met water van 20 °C zouden worden gezet, zou hiervan dan de temperatuur zijn veranderd? Leg uit."*

Bij de beantwoording van vraag a) gebruiken deze leerlingen de term 'warmte' niet. Ze komen tot de conclusie: "..... omdat de temperatuur van de omgeving eh lager is, dan eh de temperatuur in de reageerbuis..."

Het protocolfragment van de discussie over vraag b) is:

- 18 J: Ehm ja, want dan is dit de omgeving dus dan ....  
19 M: Nee wacht even hoor.  
20 J: Dan wordt dat glaasje water eh soort omgeving.  
21 M: Ja maar, maar dan stijgt-ie toch wel, dat ....  
22 J: Ja.  
23 M: Dat water van dat glaasje dan ....  
24 J: Ja dat stijgt.  
25 M: Dat water in dat glaasje met water: de temperatuur stijgt iets.  
26 S: Ja, de temperatuur wordt afgegeven aan het water. Het water geeft weer temperatuur af aan de lucht.  
27 M: Ja.  
28 J: Ja, er wordt warmte afgegeven aan het water, wat daardoor in temperatuur stijgt.

S en J komen tot de conclusie dat de temperatuur van het water in het bekersglasje zal stijgen omdat de reageerbuisen warmte

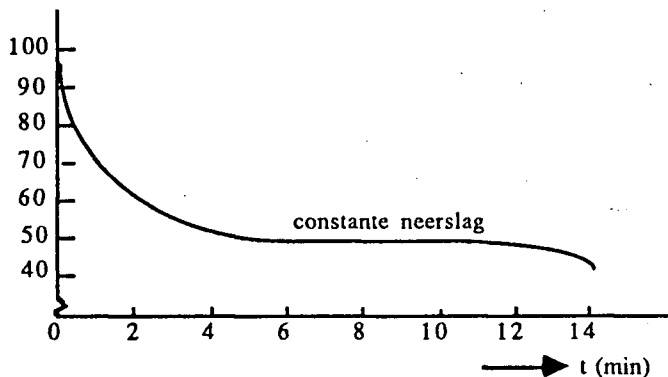
afgeven aan het water (26 en 28). M is het met hen eens (25 en 27). In 28 valt in dit protocol voor het eerst het woord 'warmte'. In hoeverre J daarmee een 'vorm van energie' dan wel een 'energietransport' op het oog heeft, valt mijns inziens hier niet te beantwoorden.

In 26 gebruikt S naar mijn mening tweemaal 'temperatuur' als synoniem voor 'warmte'. Verderop in 56 gebruikt hij opnieuw tweemaal het woord 'temperatuur' in één uitspraak, maar hier mijns inziens de eerste maal voor het begrip 'warmte' en de tweede maal voor het begrip 'temperatuur'. Toch kan S wel een onderscheid maken; zie zijn nog komende uitspraken 52, 71, 73, 76 en 78.

Opdracht 1.8 c luidt:

*"Geef in de grafiek bij 1.7 b aan in welke periode het stearinezuur stolt."*

Het door dit groepje gegeven antwoord staat in bijgaande figuur.



De betekenis van "constante neerslag" is mij niet duidelijk. Een mogelijkheid zou zijn: we zien een voortdurend 'neerslag'-proces. Maar een andere: bij constante temperatuur ontstaat een stolsel (neerslag).

Vraag 1.8 d luidt:

*"Vind je dat er in de periode die je bij c) hebt aangegeven - de inhoud van de reageerbuis afkoelt?"*

*- warmte wordt afgegeven door de reageerbuis met inhoud aan de omringende lucht?*

*Motiveer de antwoorden die je geeft."*

In het kader van de opdrachten 1.7 en 1.8 gebruik ik hier voor de eerste maal zelf de term 'warmte'. Hoe zullen deze leerlingen hierdoor worden aangesproken? Het protocol van de discussie over vraag 1.8 d geef ik in gedeelten, afgewisseld door mijn bespreking.

45 J: Ehm, nee, want dan blijft-ie net constant. Koelt-ie niet af.

46 M: Ja da's goed. Eerste streepje is nee. De temperatuur blijft constant op dat moment. Of niet?

47 J: Ja, dat zie je toch uit de tabel: dat heb je net afgeleid, dat die stolt [N.B.: de door J bedoelde tabel is de tabel met de meetwaarden die ten grondslag liggen aan de boven weergegeven grafiek.]

J en M geven een motivering van hun antwoord op de eerste vraag d). J verwijst naar de experimentele gegevens, hetgeen M in 49 overneemt. Daarbij vatten zij ".... afkoelt" op als 'de temperatuur daalt'.

48 S: Motiveer. Ja, dat is geen motivatie dat de temperatuur constant blijft, hè.

49 M: Ja, dat kan je toch motiveren via die tabel.

50 J: Je moet misschien ook zeggen waarom, hè?

51 M: Ja, dat weet ik niet.

52 S: Waarom, waarom, waarom, als iets stolt, waarom koelt het dan niet verder af? How comes?.... Ik denk dat alle energie dan nodig is om te stollen of .. nee hij raakt energie kwijt om door te stollen. Dus dan blijft de temperatuur constant ... omdat-ie steeds meer energie afgeeft.

53 J: Lijkt me stug.

54 S: Want als je, als je moet smelten dan eh neemt-ie heleboel warmte op. Daarom duurde het ook langer dat-ie eh, dat-ie bij 95 graden was.

55 M: 95.



- 56 S: Dan neemt-ie eerst een heleboel temperatuur op om te smelten en dan pas gaat de temperatuur echt stijgen.
- 57 M: Ja.
- 58 J: Dus dan zou d'r eh energie vrij komen? Bij dat stollen.
- 59 M: Ja
- 60 M: Bij dat stollen.
- 61 J: Lijkt me sterk.
- 62 M: Ja, lijkt me ook sterk.

Als ik in 52 "hij" en "ie" opvat als 'het stollende stearinezuur' dan zegt S hier dat bij stollen energie vrijkomt. In het "Dus" blijft veel impliciet van de omstandigheid dat het stolproces niet sneller kan verlopen dan het 'energietransport als warmte' naar de omgeving plaatsvindt. In 54 argumenteert S verder met behulp van het vertrouwde, omgekeerde proces dat ze zelf ook waarnamen en gebruikt daarbij een door hen geconstateerd feit. Vergelijken we 54 "neemt .... warmte op" met 52 "raakt energie kwijt" en "energie afgeeft" dan suggereert dit wel dat S 'warmte' als een energievorm ziet. Hij weet J en M niet te overtuigen (53, 61 en 62).

- 64 J: Ja als het ....  
Misschien houdt het de warmte ... gewoon makkelijker vast. Omdat het dichter wordt ... Ja, dan zou die daarna ook constant moeten blijven, he?
- 65 S: Ja, dat is het dus absoluut niet.
- 66 M: Nee, dat klopt dan niet.
- .....
- 70 M: Die houdt de temperatuur gewoon vast lijkt mij.

In 64 oppert J een andere zienswijze die door S en M wordt verworpen (65, 66). Volgens mij bedoelt J in 64 met "die" in "dan zou die daarna ..." de temperatuur van het stollende stearinezuur. J onderscheidt in 28 scherp tussen 'warmte' en 'temperatuur'. Ik neem dan ook aan dat zijn "warmte" in 64 niet als synoniem moet worden gelezen met "temperatuur" in 70 M, en kan dan 64 begrijpen als: het dichtere stolsel kan meer 'warmte' bevatten dan de minder dichte vloeistof. De reageerbuisinhoud heeft geen warmte om af te staan en dus blijft de temperatuur constant. J ziet een verband tussen de 'temperatuur van' en de 'hoeveelheid warmte in het systeem'. Een constante temperatuur

koppelt hij aan een constante hoeveelheid warmte in het systeem.

- 71 S: Nee ehm. Nee, volgens mij geeft-ie energie af, omdat daarom de temperatuur stijgt, echt waar hoor.
- 72 M: De temperatuur stijgt toch niet?
- 73 S: Nee, omdat-ie net zoveel energie af wordt gegeven aan eh van het water aan de omgeving als dat eh 't vet aan het water afgeeft; dus blijft de temperatuur constant.
- 74 M: Vat ik even niet.
- 75 J: Nee, ik ook niet.
- 76 S: Tuurlijk wel, kijk, het water geeft ehm eh energie, warmte af aan de omgeving hè?
- 77 M: Ja.
- 78 S: En dat is....ja dat is een bepaalde constante zeker of zo. Maar op een gegeven moment dan gaat dus dat spul stollen en dan geeft het net zoveel warmte af aan het water als het water aan de omgeving; dus blijft het water met dezelfde temperatuur zitten, een tijdje.
- 79 J: Zou kunnen hoor.
- 80 M: Nou ik weet het niet. Moeilijk te motiveren hoor.
- 81 S: Nou, lijkt me wel, lijkt me wel logisch. Ik weet niet of het wel zo is natuurlijk.

In 71, 73, 76 en 78 probeert S zijn standpunt, dat hij in 52 innam, te verduidelijken. Omdat de discussie over het reageerbuisje met het stollende stearinezuur gaat (en niet over dit reageerbuisje in het bekerglas met water, gesteld in opdracht 1.8 b), vermoed ik dat S met "water" het nog vloeibare en met "vet" het reeds vast geworden stearinezuur bedoelt. In dit geval kan ik 73 aldus begrijpen: zeker bij het begin van het stolproces, als de reageerbuisinhoud nog in overmaat "water" is, zegt S dat het stolsel dat ontstaat ("t vet") bij dit stollen energie afgeeft aan de 'omgeving' ("het water") waarin de thermometer staat. En dat "water" geeft op zijn beurt weer energie af aan zijn 'omgeving' (de omringende lucht). Met "net zoveel" bedoelt hij dan de gelijke energiestromen per tijdseenheid, met als gevolg dat de temperatuur van het "water"-met-thermometer constant blijft. In 73 geeft S dus zelf uitsluitsel over wat hij in 52 impliciet liet.

M en J begrijpen hem niet (74, 75). Dan geeft S in 76 expliciet een antwoord op het tweede gedeelte van vraag 1.8 d. Daar stemt M (77) mee in. In 78 veronderstelt S terloops dat deze warmte-afgifte constant is, maar belangrijker vind ik dat hij vervolgens nog duidelijker dan in 73 stelt dat als "dat spul gaat stollen" (een gedeelte van het "water" wordt vast) hierbij net zoveel warmte wordt afgegeven aan het achterblijvende "water"-met-thermometer als dit laatste afgeeft aan de omgeving, met als gevolg "een tijdje" (zolang het stolproces duurt) een constante aanwijzing van de thermometer. J en M zijn nog niet overtuigd (79, 80) en in 81 zegt S dat hij het weliswaar niet zeker weet, maar het wel een aannemelijke redenering vindt. Door 76 "... energie, warmte ..." wekt S ook hier de indruk dat hij warmte als een energievorm ziet.

Nadat de leerlingen nog even opnieuw over vraag 1.8 c hebben gesproken, komen J en M terug op het tweede gedeelte van vraag d.

89 M: Terwijl die stolt dus? Nee die houdt-ie zelf vast.

90 J: Ja, ja, ehm.

91 M: Die warmte houdt-ie zelf vast volgens mij.

92 J: Ja dat zou best wel kunnen hè?

93 M: Wat?

94 J: Ja, dat-ie het vasthoudt.

95 M: Ja, houdt-ie vast die warmte, om zelf te kunnen stollen, dus geeft-ie niet af.

96 J: Als de temperatuur gelijk blijft dan eh lijkt het me sterk dat-ie dan warmte afgeeft.

Als ik dit fragment lees tezamen met 64 - 70 dan is mijn daar gegeven interpretatie van 64 ook hier toepasbaar. Als de temperatuur constant blijft, moet ook de 'hoeveelheid warmte in het systeem' constant blijven en kan het dus geen warmte afstaan. M legt in 95 een verband tussen het vasthouden van warmte en het stolproces. Daar kom ik in 3.2 op terug. Overigens herroept M hier zijn standpunt uit 77.

Het protocol in zijn geheel overziende, kan ik concluderen dat J, die in 28 voor het eerst 'warmte' gebruikt, met deze term iets op het oog heeft dat in een systeem als zodanig aanwezig is, en M in 95 eveneens. S heeft aandacht voor energiestromen, waarbij hij vaker over 'energie' dan over 'warmte' spreekt. Zijn

uitspraken inzake 'warmte' kan ik interpreteren met de betekenis 'een systeem bevat warmte', hoewel de betekenis 'warmte is een vorm van energietransport' niet helemaal is uit te sluiten.

### 3.2 Warmtebevattende systemen

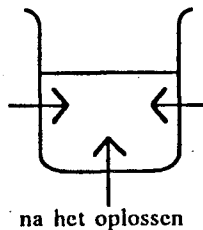
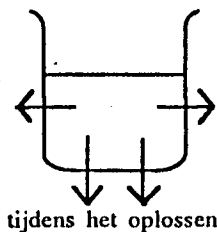
Enige protocoluitspraken uit 3.1 kan ik begrijpen door aan te nemen dat J en M werken met de voorstelling: een systeem bevat warmte. Het bleek me dat ik deze interpretatie op veel meer momenten tijdens het bestuderen van het onderzoeksmateriaal kan gebruiken, bijvoorbeeld bij de antwoorden op opdracht 1.12.

Bij deze opdracht moeten de leerlingen in een bekersglasje dat 20 ml water en een thermometer bevat, 5 gram ammoniumchloride oplossen, en voor en na het oplossen de temperatuur meten. Zij constateren een temperatuurdaling. Opdracht 1.12 c luidt dan:

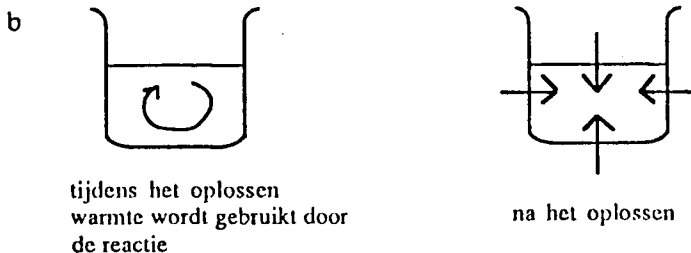
*"Geef in de weergegeven tekening (een doorsnede van een bekersglas gedeeltelijk gevuld met een vloeistof) aan waar warmte het bekersglas binnenkomt of verlaat."*

Ik kan vier soorten antwoorden onderscheiden: twee groepjes (a en b) geven twee tekeningen, terwijl de tekening van één groepje (c) het tegengestelde is van die welke ik verwachtte en die door de overige zeven groepjes (d) wordt gegeven.

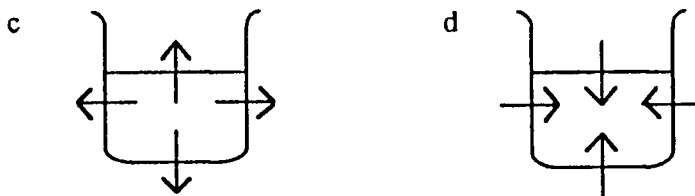
a



Desgevraagd gaf het groepje a de volgende, door mij samengevatte toelichting bij hun bovenstaande tekeningen. De temperatuurdaling tijdens het oplossen betekent dat de inhoud van het bekersglas minder warmte gaat bevatten. Wanneer alles is opgelost, neemt de oplossing weer warmte uit de omgeving op.



Een leerling uit groepje b zei me: "De oplosreactie kost warmte. Die wordt onttrokken aan het water (dat daardoor in temperatuur daalt, K.J.T.). Dat wordt aangevuld uit de omgeving."



In mijn interpretatie van de antwoorden a) en c), die ik verderop zal geven, zie ik een overeenkomst met die in 3.1 gegeven van uitspraken van J en M. In 95 ziet M een verband tussen het stollen en het 'vasthouden van warmte'. Ik kan dit aldus begrijpen. M heeft waargenomen dat tijdens het stollen de temperatuur van de buisinhoud niet verandert. Niet veranderen van de temperatuur betekent voor hem echter: de warmte blijft in het systeem ("houdt-ie vast die warmte"; "geeft-ie niet af"). Dit doet M zeggen dat als het "water" de warmte vasthoudt, de voorwaarde is geschapen dat het "water" kan gaan stollen. De toevoeging "geeft-ie niet af" kan betekenen dat voor hem normaal is dat de hoeveelheid warmte in het systeem zou dalen omdat de systeemtemperatuur hoger is dan de omgevingstemperatuur.

Mijn interpretatie van de antwoorden a) en c) is dat de dalende temperatuur die zij waarnemen, voor deze leerlingen betekent dat het systeem minder warmte gaat bevatten, dus dat warmte het systeem moet verlaten. Daarvan zal het oplossen van ammoniumchloride dan wel de oorzaak zijn, want dat afkoelen ten opzichte van de omgeving gebeurt niet zo maar spontaan. Groepje a realiseert zich bovendien nog dat als het oplossen is afgelopen, er als gevolg van het ontstane temperatuurverschil weer warmte naar het systeem zal toestromen.

Het gemeenschappelijke van deze interpretaties is dat zij veronderstellen dat voor de betrokken leerlingen:

1. een één-éénduidige betrekking geldt tussen 'hoeveelheid warmte in' en 'temperatuur van het systeem' (de ene bepaalt de andere en omgekeerd);
2. die 'hoeveelheid warmte' die het systeem bevat alleen maar kan veranderen door 'warmte transport' over de systeemgrens. Aan dit zeer eenvoudige schema worden verklaringen van waargenomen verschijnselen bij het stollen van stearinezuur en het oplossen van ammoniumchloride aangepast.

De uitspraken van S in 3.1 en de toelichting van een leerling uit groepje b kan ik interpreteren met de zojuist genoemde veronderstelling 1, al is dit niet noodzakelijk. Veronderstelling 2 maken deze leerlingen echter niet. Zij hebben mijns inziens enig besef van 'interne' processen waardoor de hoeveelheid warmte van een systeem kan veranderen.

### 3.3 'Externe' en 'interne' verandering van hoeveelheid warmte

Na opdracht 1.12 over het 'endotherm oplossen' van ammoniumchloride in water komt even later over dit onderwerp een gedachtenexperiment: opdracht 2.4. Het begin hiervan luidt:

*"Het oplossen van kaliumnitraat in water is een endotherm proces. In een reageerbuis met water, met daarin een thermometer, wordt kaliumnitraat opgelost. Beschouw de reageerbuis met inhoud als systeem."*

Na twee deelopdrachten over respectievelijk de stand van de thermometer en de "richting van het warmtetransport over de grenzen van het systeem", volgt 2.4 c:

*"1. Stel dat er een hoeveelheid warmte, ter grootte van  $q$  over de systeemgrenzen wordt getransporteerd, kun je dan met een teken (+ of -) aangeven in welke richting dat gebeurt?"*

De helft van de groepjes gaf een teken op grond van de richting waarin het warmtetransport plaatsvindt, b.v. "endotherm, warmtetransport naar binnen: - " (of omgekeerd). De andere helft gaf echter antwoorden zoals:

- \* " + is de plaats met de meeste warmte, - is de plaats met de minste warmte";
- \* " + zetten waar de warmte naar toe gaat, - zetten waar de warmte wordt onttrokken";
- \* "omdat de reageerbuis aantrekt is het + en er wordt q aan de omgeving onttrokken, dus -";
- \* "met + de warmtetoename aangeven en met - de warmteafname".

Omdat ik in eerste instantie dacht dat de vraag onduidelijk was gesteld, heb ik met alle groepjes die de tweede soort antwoorden gaven, over deze vraag doorgepraat. Vervolgens ontstond hierover een klasgesprek. Aangezien het lang duurde eer ik hun toelichting op hun antwoorden begreep, vervulde ik in dit gesprek de rol van onwetende. Veel leerlingen reageerden in de trant van: "snap je dat nu echt niet?". Opvallend vond ik de eensgezinde stemming in de klas; kennelijk begrepen ze elkaar beter dan ik hen.

Helaas heb ik van de gesprekken met de groepjes en van het klasgesprek geen bandopnamen gemaakt. Wel heb ik tijdens dit laatste gesprek telkens geprobeerd de zienswijze van de leerlingen samen te vatten, totdat ze het eens waren met de daarin gegeven beschrijving. De aldus ontstane tekst geef ik hieronder als 'citaat' weer. Hierin heeft q de betekenis die de leerlingen daar toen aan gaven, niet de thermodynamische (zie bijvoorbeeld Van Sprang, Van Roon, Verdonk, 1988) welke door mij in opdracht 2.4 c, 1 impliciet is bedoeld.

"De hoeveelheid warmte in een systeem is q. Als de temperatuur van een systeem A hoger is dan die van de omgeving, heeft het systeem een overschot aan warmte. Dat wordt weergegeven als  $+|q|$ . Als de temperatuur van een tweede systeem B lager is dan die van de omgeving, heeft het systeem een tekort aan warmte. Dat wordt weergegeven als  $-|q|$ .

Als systeem A aan zijn lot wordt overgelaten, treedt transport op van warmte uit het systeem: q daalt, of  $\Delta q < 0$ . Voor systeem B geldt dan: q stijgt,  $\Delta q > 0$ . Dit gebeurt beide spontaan (natuurlijke processen).

Systeem A kan echter ook verder worden opgewarmd:  $\Delta q > 0$ , en systeem B kan verder worden afgekoeld:  $\Delta q < 0$  (kunstmatige processen)."

Mijn moeite met het begrijpen van de leerlingen interpreteer ik achteraf als een blokkering door mijn bedoeling met het symbool  $q$ . Voor deze leerlingen heeft  $q$  hier de betekenis van warmte-inhoud van het systeem t.o.v. de omgeving, dus als het ware de 'overschot'-warmte, en niet die absolute betekenis als vermeld aan het einde van 3.2 bij veronderstelling 1. Om verwarring in symboolbetekenis te voorkomen, gebruik ik verder voor die 'overschot'-warmte  $q$ :  $Q$ . Verder stelt  $T_s$  de systeemtemperatuur en  $T_o$  de als constant beschouwde omgevingstemperatuur voor;  $\Delta T = T_s - T_o$ ;  $\Delta Q = Q_2 - Q_1$ : de verandering van de warmte-inhoud van het systeem als het van een toestand 1 naar een toestand 2 gaat, gekoppeld aan  $\Delta T_s = (T_s)_2 - (T_s)_1$ : de verandering van de systeemtemperatuur bij dit proces. Hiermee kan ik het 'citaat' als volgt samenvatten:

- \*  $Q = C.(T_s - T_o) = C.\Delta T$  waarin  $C$  een positieve grootheid voorstelt;
- \*  $\Delta Q = C.\Delta T_s$ ;
- \* natuurlijke processen verkleinen, kunstmatige vergroten  $|\Delta T|$ .

Uit het 'citaat' is niet op te maken of

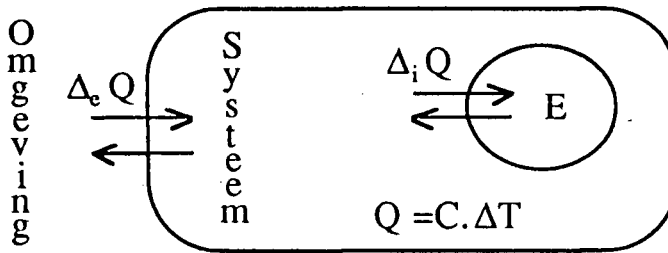
- \* de leerlingen de consequentie hebben gezien: er is evenwicht met de omgeving als  $\Delta T = 0$ , en dan is  $Q = 0$ ;
- \* zij  $C$  als een constante zien. Een natuurkundige interpretatie is: de 'warmtecapaciteit' van het systeem;
- \* zij zich het tot stand komen van de "kunstmatige processen" slechts voorstellen als een gevolg van "transport van warmte" uit of naar het systeem, zoals bij de "natuurlijke processen", of dat dit ook anderszins kan gebeuren.

Om nu de uitspraken van S in 3.1 en de toelichting van een leerling uit groepje b in 3.2 in het zojuist gegeven interpretatieschema te kunnen plaatsen, hebben we een onderscheid nodig tussen resp. 'externe' en 'interne' veranderingen van  $Q$  (symbolen:  $\Delta_e Q$  en  $\Delta_i Q$ ). Bij de eerste is sprake van "transport van warmte" over de systeemgrens, bij de tweede van een binnen het systeem gelegen oorzaak van verandering van zijn warmte-inhoud. Hiermee kunnen we de redenering van S uit 3.1 aldus schematisch weergegeven:  $T_s$  is enige tijd constant, maar  $T_s > T_o$  zodat het systeem warmte aan de omgeving blijft afstaan:  $\Delta_e Q < 0$ . Om  $T_s$  constant te houden moet er zoveel 'stolwarmte' in het systeem vrijkomen ( $\Delta_i Q > 0$ ) dat geldt:  $|\Delta_e Q| = |\Delta_i Q|$ .



De redenering die de leerling uit groepje b geeft, wordt schematisch: in het begin is  $T_s = T_o$ ,  $Q = 0$ ; tijdens het oplossen:  $\Delta_i Q < 0 \rightarrow Q < 0 \rightarrow T_s < T_o$ ; na het oplossen:  $\Delta_e Q > 0$  totdat weer  $Q = 0$  en  $T_s = T_o$ .

Deze enigszins wiskundige beschrijvingen zijn samengevat in bijgaande figuur:



Ik merkte dat verschillende leerlingen behoefte hebben zich  $\Delta_i Q$  net zo concreet voor te stellen als  $\Delta_e Q$ , met andere woorden zij willen de getekende, denkbeeldige 'E(nclave)' kunnen lokaliseren. Dat kunnen ze makkelijk als in een bekersglas wat water wordt verwarmd met behulp van een elektrische weerstand waar een stroom door loopt, maar het wordt moeilijk als in een bekersglas equivalente hoeveelheden zoutzuur en natronloog van dezelfde temperatuur worden gemengd waarbij de temperatuur stijgt. Leerlingen zeggen dan: de stoffen geven hun warmte af aan het systeem.

### 3.4. Terugblik

In de derde inleidende alinea van §3 gaf ik mijn oogmerken met deze paragraaf aan. Na een beschrijving van de wijze waarop leerlingen reageerden op mijn vragen en opdrachten inzake een afkoelingscurve en twee endotherme oplosprocessen, kan ik onder andere concluderen dat:

- \* nogal wat leerlingen expliciet gebruik maken van de voorstelling 'warmtebevattend systeem';

- \* geen enkele van de onderzochte leerlingen expliciet 'warmte' alleen maar gebruikt voor "energietransport ten gevolge van een temperatuurverschil";
- \* voor een aantal leerlingen "interne verandering van Q" nog geen gezichtspunt is.

Terugblikkend zijn de eerste twee conclusies ook niet verwonderlijk. Met genoemde probleemstellingen heb ik hen aangesproken in een context waarbij de enige arbeidsuitwisseling eventueel volume-arbeid is. In deze context wordt *ogenschijnlijk* (zie Van Sprang, Van Roon & Verdonk, 1988, noot 9) met 'warmtebehoud' gewerkt en nog steeds met termen als 'warmtecapaciteit', 'soortelijke warmte', 'oplos-', 'reactie-' en 'stolwarmte'. Iemand die zulke problemen vanuit de thermodynamische theorie beziet en oog heeft voor de geldende randvoorwaarden, zal door die terminologie niet misleid worden. Naar blijkt, gebeurt dit wel met vwo-leerlingen bij hun begripsontwikkeling naar thermodynamica toe.

#### 4. Enkele onderzoeksresultaten inzake 'energie'

Bij de invoering van  $U$  als de energie van het systeem geeft de tekenafpraak inzake  $\Delta U$  geen problemen. Gezien 3.3 verwachtte ik dat ook niet. Anders ligt het echter met het onderscheid tussen  $\Delta U$  en  $q$  uit de eerste hoofdwet. Dit blijkt uit het gesprek dat een groepje voert naar aanleiding van opdracht 4.6 a uit "Energie". Deze luidt:

*"Wanneer we het voorgaande samenvatten kunnen we zeggen:*

| *De energie  $U$  van een systeem kan veranderen door transport van een hoeveelheid warmte of door het verrichten van arbeid.*

*(Let wel: elk energietransport over systeemgrenzen, in welke vorm dan ook, wordt arbeid genoemd, m.u.v. energietransport in de vorm van warmte.)*

*In formule  $\Delta U = q + w$  (4.6.1)*

*a. Geef in jullie eigen woorden een omschrijving van vergelijking (4.6.1)."*

Dat de tekst achter de vette strepen de leerlingen uit dit groepje niet bijzonder aanspreekt bij de beantwoording van opdracht

a), blijkt uit onderstaand protocol:

1 J:  $\Delta U = q + w$

2 S: Niet zo moeilijk natuurlijk.  $q$  is de energie die je al hebt en  $w$  is de arbeid.

3 J: Ja.

4 V: Nee,  $q$  is de warmte is  $\Delta q + \Delta w$ . De verandering daarvan.

5 S: Okee

6 M: Hoezo  $\Delta$  ?

7 V: Jawel, de verandering van de energie is toch de verandering van de warmte plus de verandering van de arbeid of het verrichten van arbeid.

8 S: Is  $q$  warmte?

9 J: Ja,  $q$  is warmte.

10 V: Ja.

11 S: Oh, dan is 't goed hè?

12 J: Nou, verandering van de energie is de .....

13 V: Verandering .... energie ... verandering hoeveelheid warmte hè?

14 J: Verandering hoeveelheid warmte. Staat geen  $\Delta$  voor, natuurlijk hè?

15 M: Nee

16 V: Ja maar ja, daar komt het natuurlijk wel op neer hè?

17 S: Gewoon warmte; nee verandering ....  $q$  is warmte.

18 J: Is warmte. Warmte + arbeid, die verricht wordt op het systeem.

19 S: Warmte is energietransport gewoon.

20 J: Ja geen  $\Delta$  jongen.

.....

27 M: Er komt iets bij of er gaat iets af; nou dat is die  $q$  of die  $w$ . Moet je zelf 's iets zeggen.

Geen van de 4 jongens antwoordt met de aangestreepte tekst<sup>3</sup>. Opvallend vind ik de uitspraak van S in 2: " $q$  is de energie die je al hebt .." en die van V in 4: "..  $q$  is de warmte is  $\Delta q + \Delta w$ ." Ik kan zeker de uitspraken van S en V tot en met 16 niet anders interpreteren dan als: de energieverandering van het systeem  $\Delta U$  is samengesteld uit twee deelveranderingen  $\Delta q$  en  $\Delta w$ , waarbij impliciet  $q$  en  $w$  net als  $U$  als toestandsgrootheden worden beschouwd.

M en J verwoorden in 6, 14, 18, 20 en 27 de in opdracht 4.6

door mij gegeven informatie. Op de formulering hiervan heb ik nu wel kritiek: "transport van een hoeveelheid warmte" suggereert makkelijk een voorstelling van  $q$  als toestandsgrrootheid; 'transport van een hoeveelheid energie als warmte' zou beter zijn geweest.

Tijdens mijn nabesprekingen van opdracht 4.6 met de groepjes merkte ik dat nogal wat leerlingen aangesproken waren als  $S$  en  $V$ , en de neiging vertoonden af te haken. De opvatting ' $\Delta U$  is de som van een aantal deelveranderingen' leeft sterk. Ik kreeg van verschillende leerlingen de vraag waarom er nu in de eerste hoofdwet alleen maar  $q$  en  $w$  staan genoemd en niet bijvoorbeeld een term voor elektrische energie, kinetische energie of nog andere vormen van energie. Achteraf ben ik dan ook vanuit het gezichtspunt 'op weg naar het thermodynamische begrip warmte' ongelukkig met opdracht 3.1 die luidt:

- "a Energie kan in verschillende vormen voorkomen. Geef van een aantal energievormen die je kent een korte omschrijving;*
- b Verschillende energievormen kunnen in elkaar worden omgezet. Beschrijf in het kort een aantal energie-omzettingen."*

In de groepsverslagen lees ik elektrische en kinetische energie naast o.a. zonne-, wind-, kern- en waterenergie. De vraag naar uitbreiding van  $q$  en  $w$  met andere vormen van energie is dan niet zo verwonderlijk, zeker niet als we ons realiseren hoe deze termen in het dagelijks leven naast 'warmte' worden gebruikt. En reeds Koning (1948, p. 19), wees op het hardnekkig blijven functioneren van "primitieve ervaringsbegrippen" bij leerlingen; "zij hebben de primeur en zijn diep in de persoon verankerd". De constatering van Vegting (1977), geciteerd in §1, kan ook zo worden geïnterpreteerd.

Daar komt nog bij dat ik thans het stellige vermoeden heb dat de wijze waarop in het natuurkunde-onderwijs over de "eerste hoofdwet van de warmteleer" wordt gesproken, ook bijdraagt aan de vraag van de leerlingen naar ander energievormen. Helaas heb ik dit aspect niet in mijn onderzoek meegenomen. In vwo-natuurkundeboeken (zie bijvoorbeeld Middellink, 1980, p. 32) treffen we in één of andere variant de voorstelling aan: als aan een zeker lichaam een hoeveelheid warmte,  $Q$ , wordt toegevoerd,

wordt een deel ( $D_1$ ) voor de temperatuurstijging van het lichaam gebruikt, een deel ( $D_2$ ) voor de verandering van de onderlinge verhoudingen tussen de bouwstenen van het lichaam en een deel ( $D_3$ ) voor uitwendige arbeid om de omgeving weg te duwen:  $Q = D_1 + D_2 + D_3$ . Hierin worden respectievelijk  $D_1$  en  $D_2$  ook beschreven als de toename van respectievelijk de kinetische en de potentiële energie van de bouwstenen, tezamen de toename van de inwendige energie  $\Delta U$ . Deze corpusculaire beschouwingswijze zou oorzaak kunnen zijn geweest van de vraag naar de term "kinetische energie".

We hebben overigens niets tegen deze beschouwingswijze als zodanig. Maar, analoog aan de opmerking aan het slot van 3.4, menen we dat deze vanuit het heersende fysische model gezien correcte zienswijze, belemmerend kan werken bij begripsvorming op weg naar een gegeneraliseerde beschrijving van energieveranderingen van een systeem op een wijze die in wezen niet-corpusculair is.

## 5. Samenvatting en voornemens

Uitgaande van het gegeven dat 'enthalpie', in tegenstelling tot 'warmte' en 'energie', niet als term in de leefwereld voorkomt maar thuishoort in de chemische thermodynamica, en dat dus voor een onderscheidend gebruik van deze drie termen een thermodynamische context noodzakelijk is, is onderzoek gedaan naar de mogelijkheid 5-vwo-leerlingen in een beperkte tijd aanspreekbaar te maken voor het thermodynamisch wezenlijke onderscheid tussen 'warmte' en 'energie'. Allereerst is met dit doel een serie opdrachten geconstrueerd waarmee 37 leerlingen in tien groepjes hebben gewerkt. Van het hierop gevolgde onderzoek werden aspecten besproken die in verband staan met de vraag: in welke zin gebruiken leerlingen de term 'warmte' in gesprekken over en in hun antwoorden op deze opdrachten?

Het blijkt dat een niet onbelangrijk deel van hen 'warmte' ziet als een eigenschap van een systeem die bepalend is voor zijn temperatuur, of voor zijn temperatuurverschil met de omgeving. Een systeem bevat een hoeveelheid warmte. Dat die hoeveelheid ook door interne oorzaken kan veranderen, is niet voor alle leerlingen vanzelfsprekend. Niemand gebruikt 'warmte' expliciet alleen maar voor "energietransport ten gevolge van een temperatuurverschil", ook al is geprobeerd hen in opdrachten zo aan te spreken.

Dat 'warmte' vooral wordt gekoppeld aan warmte-inhoud, blijkt ook bij opdrachten inzake de eerste hoofdwet:  $\Delta U = q + w$ . Leerlingen interpreteren  $q$  als  $\Delta q$ , dat wil zeggen zij beschouwen 'warmte', energietransport ten gevolge van een temperatuurverschil, evenals 'energie' als een toestandsgrootheid. Als oorzaken hiervan zien we onder andere het dagelijks spraakgebruik, evenals de wijze waarop in natuurkundeboeken wordt gesproken over het opdelen van de toegevoerde warmte aan een systeem in drie bijdragen in het kader van een corpusculaire opvatting van een systeem. Ook is het zeer goed mogelijk dat een zekere eenzijdigheid in de gekozen voorbeelden - we wezen daar in 3.4 op - deze interpretatie in de hand werkt.

De reacties van de leerlingen op de ontworpen opdrachten, waarvan hierboven maar een fractie is beschreven, maken duidelijk dat 'warmte' noch voor hen, noch voor de ontwerper een probleemloos begrip is. Voordat een nieuwe serie opdrachten wordt geconstrueerd met het doel de ontwikkeling van 'warmte' en 'energie' naar de thermodynamische begrippen toe beter tot haar recht te laten komen, zal de relatie tussen leefwereldbetekenissen van 'warmte' en 'energie', betekenissen die er in het voorafgaande natuurkunde-onderwijs aan worden toegekend, en de gewenste betekenissen in een chemisch thermodynamische context nog eens grondig moeten worden doordacht. En het onderscheidend kunnen gebruiken van 'warmte' en 'energie' stelden we als voorwaarde voor de zinvolheid van het invoeren van de term 'enthalpie'.

De resultaten van dit onderzoek naar de mogelijkheid 5-vwo-leerlingen in een beperkte tijd aanspreekbaar te maken voor het thermodynamisch wezenlijke onderscheid tussen 'warmte' en 'energie', en van het onderzoek van Van Sprang, Van Roon & Verdonk (1988) over "Enthalpie in v.w.o.-chemie?" leiden ons tot de voornemens:

- \* ga door chemiedidactisch onderzoek na of het opnemen van de elektrochemische cel en dus van elektrische arbeid, naast de 'directe' weg voor dezelfde chemische reactie met slechts volume-arbeid, in de beschouwingen over de eerste hoofdwet het onderscheid tussen 'warmte' en 'energie' in thermodynamische zin toegankelijker kan maken in het kader van vwo-scheikunde;
- \* adviseer de inspectie de voor de huidige vwo-scheikunde overbodige term 'enthalpie' uit het leerplan (1984) te schrappen.

## Noten

1. Dit artikel is gebaseerd op een verslag van een onderzoek naar het begrip 'warmte' dat de eerstgenoemde auteur verrichtte in het kader van een hoofdvak chemiedidaktiek. Als in het artikel bij persoonlijke rapportages "ik" wordt gebezigd, is daarmee die auteur bedoeld. Het genoemde onderzoek past in het onderzoeksproject van de vakgroep chemiedidaktiek naar de ontwikkeling van chemische begrippen.
2. De leerlingentekst, de verzamelde protocollen en mijn onderzoeksverslag, getiteld "Thermodynamica in 5 vwo? Een aanzet tot de introductie van de grootheid enthalpie", zijn desgewenst in te zien bij de vakgroep chemiedidaktiek.
3. Eén van de redactieleden merkte het volgende op. In de aangestreepte zin wordt "of" gebruikt in plaats van "en" of van "en ook". In (4.6.1) staat echter "+" tussen "q" en "w". Als de leerlingen "of" opvatten als een voegwoord dat twee zinsdelen verbindt die elkaar uitsluiten, kunnen zij een tegenstelling ervaren met het symbool + in de formule. Hij veronderstelt dat dit mede een oorzaak zou kunnen zijn van het niet reageren op de aangestreepte zin. Ik onderschrijf dit.

## Literatuur

- Bijvoet, J.M., A.F. Peerdeman, A. Schuijff & E.H. Wiebenga (1973) *Korte inleiding tot de chemische thermodynamica*, Groningen: Tjeenk Willink, vierde druk.
- Black, O.F. (1926) *The development of certain concepts of physics in highschool students*, Potchefstroom Africa.
- Brants, F. (1976) Thermodynamisch denken en toch gewoon blijven, *Faraday* 45, 213-225.
- Brants, F. (1981) Thermodynamica toegepast in VWO-vraagstukken, *Faraday* 50, 104-112.
- Chemie 5/6 VWO; 1-8* (1985), Groningen: Wolters-Noordhoff, tweede druk.
- Erickson, G. & A. Tiberghien (1985) Heat and Temperature. In: R.Driver, E.Guesne & A.Tiberghien (eds.). *Children's Ideas in Science*, chapter 4. UK and Philadelphia USA: Open University Press, Milton Keynes.
- Koning, J. (1948) *Enige problemen uit de didactiek der natuurwetenschappen in het bijzonder van de scheikunde experimenteel onderzocht met leerlingen van de middelbare school*, proefschrift RUU, Dordrecht: Retèl en Felkers.

- Leerplan Scheikunde Rijksscholen voor v.w.o. (1984), Bijlage bij circulaire C 840121 VO/AV/RVO - 804.359.
- Middelink, J.W. (1980) *Systematische Natuurkunde C (vwo/havo)*, Apeldoorn: Uitgeverij Van Walraven b.v.
- Se-Yuen Mak & K. Young (1987) Misconceptions in the teaching of heat, *School Science Review* 68, 464-470.
- Smith, P.J.W. (1977) Vrije enthalpie en evenwicht, *Faraday*, 46, 89-96.
- Sprang, H.F. van (red.) (1984) *Collegedictaat Fysische Chemie I*, Faculteit Scheikunde RUU.
- Sprang, H.F. van, P.H. van Roon & A.H. Verdonk (1988) Enthalpie in V.W.O.-chemie?, *Tijdschrift voor Didactiek der  $\beta$ -wetenschappen*, 6, 220-230.
- Summers, M.K. (1983) Teaching heat - an analysis of misconceptions, *School Science Review*, 64, 670-676.
- Tripp, T.B. (1976) The Definition of Heat, *Journal of Chemical Education*, 53, 782-784.
- Vegting, P. (1977) Luisteren naar leerlingen V -Warmte, *Faraday*, 46, 68-70.
- Vegting, P. (1988) Zijn misconcepties "mis"-concepties?, *NVON-maandblad*, 13, 4, 134-137.
- Vos, W. de (1981) Onderwijs naar thermodynamika, *Faraday*, 50, 113-115.