

“Warmte” en “Arbeid” in proto-thermodynamisch taalgebruik van studenten

P.H. van Roon en A.H. Verdonk¹

Centrum voor Didactiek van Wiskunde en Natuurwetenschappen,
Universiteit Utrecht

H.H. ten Voorde

Didactiek der Scheikunde

Universiteit van Amsterdam²

Summary

This paper describes a qualitative research into difficulties university freshmen displayed when 'forced' to use thermodynamic 'concepts', or rather 'words', in a thermodynamic context which was, at that time, not (yet) their own context. The research also aims at the identification and the naming of students' proto-thermodynamic context(s), focussed on their concepts of work and heat, and taking a thermodynamic context of work and heat as a frame of reference.

Three 'rounds' of research were performed in three successive years, each 'round' elaborating on the preceding one. The first 'round' concentrated mainly on general students' problems with the thermodynamic concept of heat in a thermodynamic context. The second and the third one concentrated mainly on the way a 'transition' from a commonplace concept of work in an ordinary life context to a scientific concept of work is suggested in a much used Dutch secondary school method on physics education.

Our first conclusion is that the observed freshmen used "heat" and "work" in what we have named a "thermochemical context"; this can be seen as a proto-thermodynamic context. Besides, they had great difficulties with the thermodynamic system concept. Both conclusions appear to be interrelated.

1. Inleiding

“Arbeid” en “warmte” zijn woorden die eenieder vanuit het alledaagse taalgebruik bekend in de oren klinken. In het dagelijks leven verwijzen zij naar goed onderscheiden, en slechts vaag op elkaar betrokken, zaken. Het zijn ook belangrijke natuurwetenschappelijke concepten, in het bijzonder gelet op hun onderlinge relatie zoals tot uitdrukking gebracht in de Eerste Hoofdwet van de Thermodynamica.

In het natuurwetenschappelijk onderwijs zijn het moeilijke concepten. Dit wordt onder andere gedemonstreerd door een regelmatig verschijnen

van publicaties over problemen op het gebied van leren en onderwijzen van deze concepten in zowel secundair als tertiair onderwijs. Als voorbeeld kunnen we verwijzen naar artikelen van Zemansky (1970), Warren (1972), Heath (1974), Tripp (1976), Erickson (1979, 1980), Summers (1983) en Se-Yuen Mak en Young (1987).

Veel van deze docenten/onderzoekers analyseren de door hen ter discussie gestelde problemen en bieden vervolgens één of andere oplossing.

Zemansky (1970) "has been struck by the confusion existing in the minds of those whose main source of information consisted of elementary textbooks of physics and chemistry". Deze "elementary textbooks" zijn "written by two classes of authors", en "both kinds of author make the same mistakes". Hij onderkent "three main infelicities of expression: (1) referring to the 'heat in a body'; (2) using 'heat' as a verb; (3) combining heat and internal energy into one undefined concept 'thermal energy', which on one page means heat and on the next page means internal energy". Zemansky's oplossing bestaat uit een thermodynamisch "rigorous treatment of the First Law" (waarin hij trouwens zelf op één en dezelfde bladzijde warmte zowel beschrijft als "a form of energy", "energy transferred", en als een "energy flow", een "method of energy transfer"). Deze "rigorous treatment" dient als uitgangspunt te nemen "the idea of internal energy in terms of molecular kinetic and potential energies", welk "idea", naar zijn mening, "students have shown themselves willing to accept". En "once they have a feeling for internal energy, they accept work and heat as methods of energy transfer and learn to handle the first law acceptably".

Ook Warren (1972) neemt waar dat "in many textbooks heat is explicitly or implicitly defined as if it were internal energy" en "very often heat is said to be the kinetic energy of the molecules of a body". Na het geven van een grondige uiteenzetting waarom dit thermodynamisch onjuist is (waarin hij warmte definieert als "energy transmitted by means of a temperature difference only" en als "energy in the process of transfer"), beschrijft Warren de resultaten van een onderzoek naar definities die studenten aan warmte geven. Hij stelt: "one hundred and forty eight university entrants were asked to define heat and internal energy, Not one gave meaningful definitions of both these quantities, nor was there a single statement of the first law of thermodynamics. The most popular 'definition' of heat was the bare statement 'heat is a form of energy' ". Uiteindelijk geeft Warren geen andere oplossing voor dit onderwijsprobleem dan dat het noodzakelijk is deze concepten met grote zorgvuldigheid te introduceren.

Tripp (1976) verklaart dat "the concept of heat is basic to an understanding of energy transfer and elementary thermodynamics. Unfortunately, many students approach the study of science with a complete misunderstanding of the concept of heat. This misunderstanding will be reinforced if any one of a large number of available general chemistry textbooks is consulted". Na het geven van de "generally accepted qualitative definition of heat: heat is energy transferred from one system to another solely by virtue of a difference in temperature", komt Tripp tot de conclusie dat "the most common misconceptions regarding heat relate to the idea that it is something which is a component of a system". Nadat hij een grondig overzicht heeft gegeven over de betekenis van warmte en de Eerste Hoofdwet in de thermodynamica wijst Tripp op verschillende dwalingen in zo'n twintig tekstboeken, grotendeels soortgelijke "textbook errors" als al onderkend door Zemansky (1970). Uiteindelijk verklaart Tripp dat "the successful teaching of the concept of heat will be accomplished if a clear definition of the system, the surroundings and the boundary is presented followed by an emphasis on the necessity of a temperature *difference* between the system and the surroundings and the associated transfer of energy across this boundary".

Erickson (1979, 1980) beschrijft de resultaten van een empirisch onderzoek naar opvattingen van jonge kinderen over warmte en temperatuur. Hij onderscheidt drie verschillende "viewpoints" op warmte en temperatuur: het "kinetic viewpoint" (kinetische energie van moleculen) en het "caloric viewpoint" (warmtedeeltes, warmtestof), beide door hemzelf ingevoerd, en het "children's viewpoint", een "set of intuitive beliefs" in een eerder stadium ingebracht door ca. 12 jaar oude kinderen tijdens diepte-interviews. Eén van de conclusies van dit onderzoek is dat "many" (lagere/middelbare school) "students found other viewpoints of heat equally or more attractive than the Children's Viewpoint. In particular, the statements used to articulate some of the Caloric theory were rated higher than other viewpoints"

Summers (1983) bevestigt dat "heat is undoubtedly one of the most difficult topics conceptually in the whole secondary school science curriculum. A major problem is that nearly all textbooks deal with heat in a manner which is likely to confuse students". Hij gaat verder: "a basic difficulty has always been that the term heat is often used in everyday language as though it signified something that a substance can contain. However, it is now widely acknowledged by both science teachers and textbook authors that this is to confuse heat with internal energy. The problem is undoubtedly linked to the use of the word heat as a noun,

which in turn may have its roots in the early caloric theory in which heat was regarded as a substance". Summers suggereert dat "use of the word *heat* as a noun should be avoided. We should always try to use the word *heating* (a process) or verbal forms *Heating* is correct, since this unambiguously defines a *process* of energy transfer. If these guidelines are adopted by teachers and in future editions of textbooks, there is every chance that future generations of students will be less confused in their understanding of elementary thermodynamic concepts than many are today". Dit is precies de oplossing die eerder werd aangedragen door Heath (1974) maar daarvoor al was verworpen door Zemansky (1970).

Se-yuen Mak and Young (1987) verwerpen Summers' oplossing: "one proposal is to avoid the word 'heat' as a noun. This proposal ... at first sight seems to solve the problem.

Moreover it draws attention to 'heating' as a process rather than a state, which is certainly a step in the right direction. At the very least it avoids referring to internal energy as heat. However, on close scrutiny, the proposal has a number of problems as well, not the least of which is the danger of falling into the opposite error of referring to heat as internal energy or *transfer* (cursivering door de auteurs) of internal energy. ... Just as one objects to expressions which imply that heat can be stored, one must equally object to suggestions that internal energy can be transferred". Hun oplossing is: "we wish to stress that the difference" (*in casu* tussen warmte en inwendige energie) "is best appreciated if one has a clear picture of what constitutes a system, a state of a system, and a process in which a system evolves from one state to another".

Met uitzondering van die van Ericson zijn alle andere hierboven beschreven verhandelingen "tekstboek studies" en niet gebaseerd op empirisch didactisch onderzoek. Ze zijn geschreven door thermodynamica docenten in een thermodynamische context, precies die context waarin zij hun studenten beogen in te voeren. Daarom is het twijfelachtig of de betrokken studenten, niet gewend als ze zijn aan een dergelijke thermodynamische context, de voorgestelde oplossingen wel kunnen bevatten.

Dit artikel beschrijft een begin van empirisch didactisch onderzoek naar problemen met leren en onderwijzen van "arbeid" en "warmte" in een thermodynamische context³. Uiteindelijk doel is het ontwikkelen van 'nieuw' thermodynamicaonderwijs, waarin *de eigen context (of contexten) van studenten als vertrekpunt wordt/worden genomen op een route die uiteindelijk moet leiden naar een thermodynamische basiscontext, welke niet wordt 'overgedragen' maar door de studenten zelf wordt ontwikkeld.*

Als eerste stap is onderzoek gedaan gericht op het identificeren van deze eigen (proto-thermodynamische?) studentencontext(en); het resultaat van dit onderzoek wordt hier beschreven.

2. De onderwijs-omgeving van dit onderzoek

Het empirisch didactisch onderzoek, beschreven in dit artikel, werd in gang gezet door een aantal 'symptomen' van studenten-problemen met thermodynamica.

Eén van deze symptomen was dat eerstejaars scheikundestudenten, blijkens rapportage van betrokken docenten, 'problemen' hadden met de begrippen warmte, arbeid, inwendige energie en enthalpie tijdens hun inleidende college/werkcollegecyclus "Fysische Chemie I". Een ander symptoom was dat werd gerapporteerd dat studenten in een latere fase van het scheikundecurriculum, wanneer hen werd gevraagd om thermodynamische begrippen 'los te laten' op laboratorium-praktijk-situaties, daartoe niet goed in staat waren.

We besloten ons niet te richten op pogingen tot symptoom-bestrijding, bij voorbeeld door het aanbieden van (mathematische) probleemoplossings-heuristieken zoals beschreven door Mettes and Pilot (1980), Mettes, Pilot, Roossink and Kramers-Pals (1980, 1981), en recent door Hamby (1990). Evenals Se-yuen Mak and Young (1987) "we do not want to treat thermodynamics as a set of related algebraic symbols and equations whilst ignoring the underlying thermodynamic concepts behind symbols and equations".

Dit onderzoek werd verricht tijdens een inleidende cursus fysische chemie voor eerstejaars scheikundestudenten aan de Universiteit Utrecht. Deze cursus was helemaal aan het begin van het curriculum geprogrammeerd. De cursus bestond uit een reeks van achtentwintig colleges van ieder twee uur en wel over drie verschillende onderwerpen: achtereenvolgens veertien over chemische thermodynamica⁴, zeven over kinetiek en zeven over elektrochemie. Per week werden twee colleges gegeven. Ieder college ging vergezeld van twee uur werkcollege, waarin de studenten in kleinere groepen oefenden in het oplossen van thermodynamische vraagstukken door het maken van opgaven op het gebied van de stof die even tevoren tijdens het college behandeld was. Er waren rond zes van deze groepen, elk bestaande uit circa twintig studenten en een werkcollegedocent. Dit artikel beschrijft onderzoek dat is gehouden tijdens drie achtereenvolgende college/werkcollegecycli; het omspannt dus een tijdvak van drie jaar.

Het onderzoek kan (achteraf) worden onderverdeeld in twee deelonderzoeken, waarvan het tweede voortbouwt op het eerste.

Deelonderzoek 1 begon in het eerste jaar met het observeren door de onderzoeker van slechts één groepje studenten en wel gedurende alle werkcolleges over thermodynamica. Het richtte zich op het verzamelen van thermodynamisch gezien 'opmerkelijke'⁵ studenten-uitspraken over "warmte" en "arbeid", eenvoudig door het luisteren naar, en op band opnemen van, discussies van enkele willekeurig samengestelde en regelmatig van samenstelling wisselende kleine subgroepjes van circa vier studenten die bezig waren met 'gewone' thermodynamica-opgaven. Omdat dit deelonderzoek in het eerste jaar pas enkele weken na het begin van de werkcollegecyclus kon beginnen, en omdat juist gedurende die eerste weken de werkcollege-opgaven zich toespitsten op warmte, arbeid en de Eerste Hoofdwet, werd het in het tweede jaar voortgezet. In dit jaar werden de in het eerste jaar gemiste werkcolleges bijgewoond.

Deelonderzoek 2 werd verricht in het tweede en derde jaar, gelijktijdig binnen twee groepen studenten, maar alleen gedurende de eerste twee werkcolleges. Deze werkcolleges waren gesitueerd vóór de behandeling van de Eerste Hoofdwet op het college. Normaliter werden gedurende deze werkcolleges een aantal niet-thermodynamische 'inleidende zaken' behandeld. Voor deze twee groepen werden echter, op basis van een analyse van resultaten uit deelonderzoek 1 waarin met name werd geprobeerd inhoud te geven aan 'opmerkelijk', enkele speciale opgaven ontworpen. Hierin werd beoogd aandacht van de studenten te vragen voor 'de' thermodynamische betekenis van "warmte" en "arbeid", en dan in het bijzonder voor de wijze waarop deze betekenis verschilt van 'de' betekenis(sen) in de leefwereld respectievelijk in de schoolchemie. Opnieuw werkten de studenten in kleine subgroepjes aan deze opgaven, maar deze keer waren het vaste subgroepjes, door ons samengesteld. Er waren ongeveer vier van deze subgroepjes, elk bestaande uit vier tot zes studenten. Daarnaast was er bij iedere werkcollegegroep een 'waarnemer' aanwezig. In één groep werd de rol van 'waarnemer' vervuld door de werkcollegedocent; in de andere groep trad de onderzoeker op als 'waarnemer', en nam soms ook de rol van de werkcollegedocent over.

De studenten werd dringend verzocht om, werkende aan deze speciale opgaven, hun oplossingen onderling te bediscussiëren en daarbij met name aandacht te besteden aan de moeilijkheden die ze ondervonden bij het zoeken naar deze oplossingen. In het tweede onderzoeksjaar waren deze opgaven nog erg voorlopig en experimenteel van aard. Daarom werd in dit stadium alleen schriftelijk onderzoeksmateriaal verzameld, (mede) aan de hand waarvan de opgaven zowel wat betreft lay-out als wat

betreft onderlinge samenhang sterk werden veranderd. Deze verandering bleek tevens een verbetering te zijn in die zin dat aan de hand van dit geherstructureerde opgavenmateriaal beter zicht kon worden verkregen op de wijze waarop de geobserveerde studenten, werkend met deze opgaven, betekenis gaven aan de begrippen warmte en arbeid, alsmede op de context waarin ze deze begrippen plaatsten⁶. In het derde jaar werden alle groepsdiscussies binnen de subgroepjes van studenten, die nu werkten aan de verbeterde versie van de opgaven, simultaan op band opgenomen met behulp van miniatuur bandrecorders (type 'Walkman'); deze bandrecorders werden dermate 'gewoon' gevonden dat hun aanwezigheid niet als storend werd ervaren. Daarnaast werd de studenten verzocht individueel aantekeningen te maken en een copie daarvan aan de 'waarnemer' te doen toekomen. Ook de 'waarnemers' maakten regelmatig aantekeningen, met name van waarnemingen die als 'achtergrondinformatie' van belang zouden kunnen zijn voor het interpreteren van de op de band opgenomen groepsdiscussies. Opgaven, bandopnamen, aantekeningen van de individuele studenten en aantekeningen van de 'waarnemers' vormden gezamenlijk ons onderzoeksmateriaal.

Gedurende beide deelonderzoeken verzamelden we in totaal ongeveer 35 uur aan bandopnamemateriaal en honderden bladzijden geschreven aantekeningen. Voor het bereiken van het doel van ons onderzoek, namelijk zicht krijgen op de context(en) waarin studenten "warmte" en "arbeid" plaatsen en de betekenis(sen) die ze daarbij aan deze begrippen geven, relevant lijkende delen van het opnamemateriaal werden als protocol uitgeschreven.

De op deze wijze verkregen onderzoeksgegevens werden nauwgezet geanalyseerd vanuit het volgende "gezichtspunt": *"is het mogelijk verschil(len) aan te wijzen tussen 'de' betekenis van "warmte" en "arbeid" in een thermodynamische context en 'de' betekenis (of betekenissen) die door de waargenomen studenten aan deze woorden wordt (worden) gegeven"*. Waargenomen betekenisverschillen werden gebruikt als 'indicatoren' voor (mogelijke) contextverschillen. Hierbij werd 'de' betekenis van deze begrippen als aangegeven in een door ons geformuleerde 'thermodynamische basiscontext' (zie Van Roon, Van Sprang & Verdonk, 1992) als referentiekader gebruikt.

Uiteraard zijn 'de' thermodynamische betekenis van "warmte" en "arbeid" en 'de' waargenomen studenten-betekenis(sen), die we hierboven noemden, *geïnterpreteerde* betekenissen. Deze interpretaties werden echter geïntersubjectieerd door middel van triangulatie (Berg, 1989; Maso & Smaling, 1990), zowel binnen de groep van auteurs als

ook daarbuiten met behulp van experts op het gebied van (onderwijs in) thermodynamica en van didactiek.

Het empirisch onderzoek, dat in dit artikel wordt beschreven, is hoofdzakelijk verricht door de eerste auteur. Het is kwalitatief onderzoek, en beoogt, zoals te doen gebruikelijk voor dit type onderzoek (Maso & Smaling, 1990) "uit te gaan van een cyclische" (of is het meer een 'spiraalvormige') "of interactieve werkwijze, waarin dataverzameling en analyse elkaar voortdurend afwisselen en elkaar beïnvloeden". Deze werkwijze is 'afgebeeld' in fig. 1

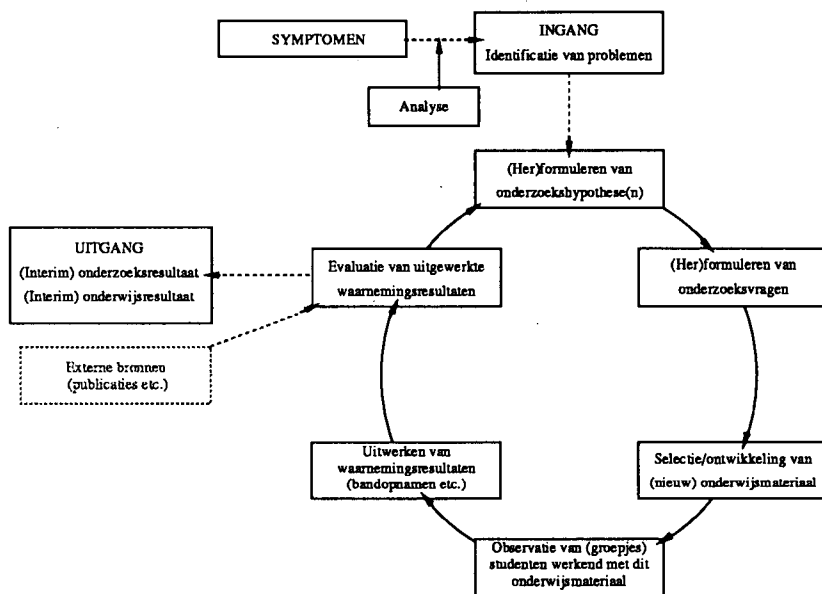


Fig 1. De onderzoekscirkel (spiraal)

Hoewel het in dit artikel beschreven onderzoek werd uitgevoerd in drie achtereenvolgende jaren, kan het, naar onze mening, integraal worden gekwalificeerd als *inleidend onderzoek*, als een 'nul cyclus'. Voornaamste reden voor deze benoeming is dat in al die drie jaren het onderzoek nog niet was gebaseerd op één of meer *van te voren gestelde* onderzoeksvragen.

3. “Arbeid” en “warmte” in studenten-uitspraken

Onderstaande protocollen vormen slechts een beperkte greep uit het totale protocolmateriaal; hun keuze is in doorslaggevende mate bepaald door het criterium “hoge informatiedichtheid”. Ze moeten echter wel als voorbeeldig worden beschouwd voor de wijze waarop alle geobserveerde studenten woorden als warmte en arbeid in hun groepsdiscussies hanteerden (‘overeenkomstige’ protocollen voor andere discussiegroepen zijn aanwezig). Wij zijn dan ook van mening dat we de aan de hand van deze protocollen getrokken conclusies mogen generaliseren over de gehele populatie van geobserveerde studenten.

Waar in de volgende protocollen, en in de bespreking daarvan, namen worden gebruikt, staat de naam “Peter” altijd voor een niet-student (meestal voor één van de betrokken werkcollegedocenten). “Peter” wordt gebruikt voor meer dan één persoon. Alle andere namen verwijzen naar individuele studenten. Het zijn echter allemaal verzonnen namen.

Deelonderzoek 1: warmtereservoir

Vraag:

“Bereken de entropieverandering ΔS voor het warmtereservoir”.

John en Peter praten over de betekenis van “warmtereservoir”.

John zei zojuist dat hij “aannam dat dit adiabatisch was ...”.

Protocol 1:

- P Wat is adiabatisch?
- J Ehm, dit eh, eh nou, eh hier wordt geen warmte, eh, netto dan opgenomen.
- (stilte)
- 5 P Eh, jij bedoelt het warmtereservoir en het systeem totaal zie jij als een, een adiabatisch ...
- J Nee, alléén het warmtereservoir.
- P als een, een adiabatisch systeem?
- J Ja.
- 10 P Dat vin’k vreemd want het warmtereservoir dient nou juist om warmte af te staan of warmte op te nemen.
- J Ja, maar ik bedoel eigenlijk dat eh, het ... dat het eh ... de warmte die wordt opgenomen gelijk is aan de warmte die wordt afgestaan.
- 15 P Dat de warmte die het systeem afstaat door het warmtereservoir wordt opgenomen en omgekeerd?
- J Ja.
- P Ja.
- J Dan krijg je de q reversibel, eh, die wordt afgestaan is gelijk aan q reversibel die wordt opgenomen en dat ze samen nul zijn.
- 20

- (zeer langdurige stilte)
- P En dat is alletwee bij dezelfde temperatuur?
- J Ja.
- 25 P Nou, dan is totaal, eh , eh , nou maar jij zei de ΔS van het warmereservoir is nul.
- (stilte)
- J Eh, ja.
- P Dat begrijp ik niet ... want jij zegt het warmereservoir neemt zoveel warmte op als het systeem afstaat of omgekeerd.
- 30 J Nee, ik zei, eh, dat het warmereservoir ... net zoveel warmte opneemt als het afstaat aan de cylinder ...
- (zeer langdurige stilte)
- J anders, eh, blijft de temperatuur ook niet constant.
- 35 P OK eh, nou begrijp ik je pas. Ik vind het helemaal geen gekke veronderstelling eh ... eh, dus jij zegt eigenlijk, jij vat het warmereservoir op als een soort buffer ... voor warmte.
- J Ja.
- P Nou, zo wordt het, eh, dus niet bedoeld en dat is, eh, kennelijk weinig op het college ter sprake geweest en, eh, ik zou dus die ..
- 40 hele vraagstelling maar laten schieten. Als jij dit goed gedaan hebt, dan is de kern van de vraag d'r geweest.
- J Oh?

In een thermodynamische context is een warmereservoir, oorspronkelijk geïntroduceerd door Carnot als benoeming voor een zeer (oneindig) groot 'vat' met 'warmte-deeltjes' (caloric), een omgeving die is bedoeld om één van de consequenties te omzeilen van de wetmatigheid die later bekend werd onder de naam Nulde Hoofdwet van de Thermodynamica⁷ Deze consequentie is dat twee thermodynamische systemen van oorspronkelijk verschillende temperatuur wanneer ze in rechtstreeks thermisch contact worden gebracht uiteindelijk dezelfde *tussenliggende* evenwichtstemperatuur aannemen. Een warmereservoir echter, waarvan wordt aangenomen dat het zeer veel groter is dan het systeem van eindige grootte waarmee het in thermisch contact wordt gebracht, legt zijn temperatuur op aan dat systeem. Aangenomen wordt dat dit thermisch contact het inwendig evenwicht van het warmereservoir niet verstoort (Tisza, 1966). Een thermostaat kan worden beschouwd als een 'vertaling in de praktijk' van een thermodynamisch warmereservoir.

John beschouwt blijkbaar een warmereservoir als een 'adiabatisch systeem' (regel 7-9) omdat er, naar zijn mening, geen netto 'warmte'-opname door het reservoir plaatsvindt (regel 2, 3) en er dus geen netto 'warmte' uitwisseling is tussen het warmereservoir en het resterende deel van de 'werkelijkheid': "het warmereservoir ... neemt net zoveel warmte op" (ergens anders vandaan, bij voorbeeld van een dompelaar) "als het afstaat aan de cylinder" (regel 30, 31) "anders blijft de temperatuur ook

niet constant" (regel 33). John praat over een thermostaat als "een soort buffer ... voor warmte" (woorden die hem overigens door Peter in de mond worden gegeven). Hij verwijst naar het warmereservoir met het woord adiabatisch. Klaarblijkelijk betekent "adiabatisch" voor hem "constante warmte" in plaats van "geen 'warmte'uitwisseling mogelijk". John lijkt te redeneren in termen van *behoud van warmte*. Voor hem lijkt "warmte" een 'toestandsgrootheid' te zijn, "iets in een lichaam", en geen 'procesgrootheid' (Zemansky, 1970).

Zich volledig concentrerende op enkel en alleen zijn warmereservoir, lijkt John niet de *combinatie* van cylinder en warmereservoir te isoleren van de rest van de 'werkelijkheid', zoals nodig is om ze tot combinatie van systeem en omgeving in thermodynamische zin te laten worden. Immers als de 'warmte' die is overgedragen van het warmereservoir naar de cylinder in zijn 'warmtebuffer' wordt gecompenseerd, dan moet die 'compenserende warmte' toch ergens vandaan komen, namelijk van ergens buiten zijn 'buffer' (regel 30, 31). En dit is in strijd met de thermodynamische betekenis van "omgeving".

Overigens gebruikt John de woorden omgeving en systeem helemaal niet, zelfs niet wanneer Peter dat wel doet. Hij praat alleen over warmereservoir en cylinder (zie bijvoorbeeld regel 28 t/m 31). Het blijft onduidelijk of John's 'warmte' verwijst naar "warmtestof" (caloric) of naar "warmteenergie".

Peter is niet in staat om "warmereservoir" voor John te problematiseren; hij breekt gewoon de discussie af met een dooddoener over het tentamen (overigens wel degelijk relevant voor John!).

Omzetting van arbeid in warmte

Vraag:

"Hoeveel arbeid zou op het systeem verricht worden in het denkbeeldige geval dat bij een constante druk van 1 atm en bij 25 °C de dissociatiegraad van 0 op 1/6 gebracht kon worden?"

(N.B. Het systeem is een 'thermodynamische zuiger'⁸ bevattende N₂O₄ gas in evenwicht met NO₂ gas)

Peter onderwijst Anne over een (thermodynamische?) relatie tussen arbeid, warmte en energie.

Protocol 2:

- A ik moet toch arbeid verrichten voordat eh ... voordat ik energie ergens eh ... kan eh ... toevoeren.
- P In welke zin gebruik je dan arbeid?
(zeer langdurige stilte)
- 5 A Nou ja voordat ik ergens eh ... energie eh ... aan toe kan voeren, moet ik arbeid verrichten, zo simpel is dat!
- P Eh ... ja, ja dat begrijp ik niet ... eh ... ik begrijp niet wat jij wi ... mij wilt vertellen.
(stilte)
- 10 A O nee? Nou , wa ... wat mij betreft is dat niet mijn fout, maar eh (grinnik)
-
- A Ja ik bedoel eh ...
(langdurige stilte)
- 15 A hier, als ik dit ding (pakt een schrift) een bepaalde en ... eh ... potentiële energie wil geven ...
- P Ja.
- A dan moet ik arbeid verrichten door 'm zò omhoog te brengen (tilt het schrift boven zijn hoofd).
- 20 P Ja, dat begrijp ik.
- A Ja, nou, dat is toch precies hetzelfde, of niet?
- P Nee ...
- A Nèt ... nèt zei ik ook als ik iets ... eh ... ergens energie aan toe wil voeren, moet daar arbeid op verrichten ...
- 25 P nee!!!
- A en nou doe ik dat òk en dan begrijp U me wel!
- P Ja, omdat dit een zuiver mechanisch eh ... voorbeeld is ... en jij gebruikt daar ...
- A O ja, als ik warmte toe ga voeren eh ...
- 30 P jij gebruikte dus daarbij de woorden potentiële energie en arbeid en
- A Ja.
- P en eh, ik ... ik ... ik weet uit de mechanica ... (terzijde: zeg we zijn nog bezig hoor!) ja, ehm ... ehm ... de ... de verrichte arbeid is het verschil in potentiële energie, ja OK. Maar hier gaat het om een .. eh thermodynamisch probleem! Hier gaat het om de relatie ... tussen ... arbeid, warmte en energie, en energie heeft daar de betekenis ... van ... de energietoestandsfunctie! (stilte) En dat is niet de energie in jouw ... m ... m ... in jouw bet mé ... mechanische betekenis!
- 40 A Ja maar ik zeg ... ik denk dus hier dat die eh ... dat ik die ... toestandsfunctie dus moet veranderen want de dissociatiegraad die is eerst nul ... dus ik heb alléén maar N_2O_4 ... en dan moet ik dus eh ... eh ... een deel een zesde daar van die N_2O_4 moet ik omzetten in $2 NO_2$.
- 45 P Ja

- 50 A Nou, die energie moet ik tðevoeren (stille) en dat kan ik alléén maar doen door ... op de één of andere manier eh ... rbeid te verrichten zo en ... zodat er wrme ontstaat zodat die ... die  nergie opgenomen kan worden of zoiets op een drgelijke manier, weet ik veel hoe ... anders.
- P O! ... O, dus ... eh ..
(stille)
- 55 P als jij eh ... eh .. eh in een elektriciteits ... ja ik, ik ... ik verzin nou maar wat, als jij in een elektriciteitscentrale ... eh ... kolen wilt verbranden om daar ... eh ... de dynamo mee aan te drijven zodat je een elektrische spanning kunt opwekken ... moet je  erst daar arbeid op verrichten ... om ... eh ...?
- A Ja! Maar hier gaat het niet vanzlf! ...

Anne heeft problemen met het maken van onderscheid tussen *mechanische energie* (kinetische en potentiële energie van een macroscopisch lichaam, bijvoorbeeld van het 'systeem' als geheel) en *thermodynamisch inwendige energie* (energie opgevat als toestandsfunctie) (regel 1, 2; regel 15 t/m 26, waarin "hetzelfde" in regel 21 slaat op regel 1, 2)

Peter probeert haar te onderwijzen, vanuit zijn thermodynamische context, waar ze een 'fout' maakt en waarom (regel 33 t/m 40) maar blijkbaar zonder succes (regel 47 t/m 51). Zelfs het gebruik van een voorbeeld uit het dagelijks leven, de elektriciteitscentrale, werkt niet (regel 54 t/m 58): Peter vraagt aan Anne of zij bedoelt dat om 'warmte' uit brandende steenkool te krijgen er eerst arbeid op die steenkool moet worden verricht. Waarschijnlijk neemt hij aan dat dit voorbeeld zo absurd is dat hij Anne wel van haar ongelijk zal kunnen overtuigen. Anne is het er echter, zeer tot Peter's verbazing, mee eens! (regel 57 t/m 59).

Anne redeneert in termen van *omzetting* in plaats van behoud van energie: "dat kan ik alleen maar doen door op de één of andere manier *arbeid te verrichten* zodat er *warmte* ontstaat zodat *die energie*" (die warmte) "opgenomen kan worden of zoiets" (regel 47 t/m 50). Ze lijkt te bedoelen dat "*arbeid verrichten*" ('arbeidsenergie') doet ontstaan (wordt omgezet in) "warmte" ('warmteenergie'), en ze koppelt daarbij "warmte" aan "energie" (warmte is een vorm van energie). Op deze manier redenerende, vat ze klaarblijkelijk "warmte" op als 'toestandsgrootheid' en niet als 'procesgrootheid'. Deze *warmte-in-arbeid omzetting* is bekend uit uitdrukkingen zoals "wrijvingswarmte".

Peter en Anne lijken 'verschillende talen' te spreken. Het resultaat is misverstand. Peter's onderwijzen is een complete mislukking.

Interpretatie van deze geprotocolleerde uitspraken

Er zijn tenminste twee historische natuurwetenschappelijke opvattingen bekend waarin warmte wordt gezien als 'toestandsgrootheid'.

In de eerste werd "warmte" opgevat als zijnde van *materiële* aard: "warmtestof" (door Lavoisier in 1787 "caloric" genoemd (Roller, 1950; Tisza, 1966)). We willen een dergelijk 'materiëel' warmtebegrip benoemen als "*calorisch warmtebegrip*". In de tweede werd "warmte" opgevat als zijnde van *energetische* aard: "warmteenergie" of "thermische energie". Deze opvatting was historisch een rechtstreekse opvolger van de calorische opvatting, en een voorloper van de klassiek thermodynamische opvatting (of wellicht zelfs een allereerste begin daarvan). Hij hoort ook thuis in de calorimetrische thermochemie (Mach, 1986). We willen dit 'immateriëel' warmtebegrip benoemen als "*energetisch warmtebegrip*".

In beide opvattingen kunnen we een principe van *behoud van warmte* aanwijzen. Maar dit principe is voor beide niet identiek. Ten aanzien van 'caloric' kan het feitelijk worden beschouwd als een voorbeeld van het principe van *behoud van massa*: 'caloric', warmtestof, wordt als onvernietigbaar gezien. Ten aanzien van 'warmteenergie' kan het worden beschouwd als een voorbeeld van het principe van *behoud van energie*. Daarnaast wordt er in de literatuur nog een andere, niet natuurwetenschappelijke of voor-natuurwetenschappelijke opvatting over warmte gerapporteerd: een "naïef empirische" (Tisza, 1966) *dagelijkse leven opvatting*, gekarakteriseerd door een onderscheid tussen "heet" en "koud" en het ontbreken van een onderscheid tussen "warmtehoeveelheid" en "warmteïntensiteit" (*in casu* temperatuur) (zie ook Roller, 1950; Vegting, 1977; Driver, Guesne & Tiberghien, 1985; Terpstra, Van Sprang & Verdonk, 1989). Deze opvatting werd overigens in ons onderzoeksmateriaal niet aangetroffen.

Deelonderzoek 2: een schoolboek over "arbeid"

Toen we (in deelonderzoek 1) eenmaal tot de voorlopige conclusie waren gekomen dat eerstejaars studenten, die 'vers' van het middelbaar onderwijs afkomen, "warmte" gebruiken als 'toestandsgrootheid' en niet als 'procesgrootheid', besloten we ons verder te concentreren op "arbeid": wellicht zou het minder moeilijk voor ze zijn om "arbeid" te zien als 'procesgrootheid'.

Om deze 'hypothese' te onderzoeken, ontwierpen we enkele speciale opgaven waarin ze werden 'uitgenodigd' om "arbeid" nader te analyseren, waarbij we de (bekend veronderstelde) tekst van een paragraaf over "arbeid" uit een natuurkunde middelbare schoolboek als 'gespreks-

organizer' gebruikten. We kozen hiertoe een paragraaf uit Middelink (1978)⁹: "Waaruit blijkt hoe de definitie van arbeid tot stand komt". In deze paragraaf probeert de auteur van een leefwereldbegrip arbeid te komen tot een natuurkundig begrip arbeid. Hij doet dit aan de hand van een beschrijving van een metselaar, die op het dak van een gebouw staat en een zak cement omhoog hijst. De kern van het betoog is als volgt:

- "Een metselaar die een zak met cement omhoog trekt, verricht volgens het 'gewone' spraakgebruik arbeid, want hij constateert dat dit hem inspanning kost.
- 5 Uit ervaring weet de metselaar dat hij méér arbeid verricht naarmate de zak zwaarder is (hij moet dan een grotere spierkracht uitoefenen) en naarmate de zak over een grotere afstand omhoog gebracht moet worden.
- Om nu een voor de natuurkunde *meetbaar* begrip arbeid te krijgen, ligt de volgende redenatie voor de hand:
- 10 - Hijst de metselaar de zak over een afstand van 1 meter op, dan verricht hij een zekere hoeveelheid arbeid.
 - Hijst de metselaar dezelfde zak over een afstand van 3 meter op, dan verricht hij driemaal zoveel arbeid.
 15 - Hijst de metselaar gelijktijdig *twee* even zware zakken over een afstand van 3 meter op, dan verricht hij tweemaal zoveel arbeid als in het vorige geval en dus zesmaal zoveel arbeid als in het eerstgenoemde geval.
- Deze redenatie houdt in dat we in de natuurkunde arbeid opvatten als *het produkt van kracht en verplaatsing ...*
- 20 (...)
- Verder merken we op dat de grootheid arbeid direct gekoppeld is aan de grootheid kracht. Dit betekent dat we eigenlijk niet mogen zeggen: de metselaar verricht arbeid (zoals we dit in de omgangstaal zijn gewend), maar dat we behoren te zeggen: de spierkracht van de metselaar verricht arbeid (en wel op de zak met cement).
- 25 Kortom: *arbeid wordt verricht door een kracht!*
- Tenslotte merken we op dat de grootheid arbeid óók gekoppeld is aan de grootheid verplaatsing. Met andere woorden: er wordt alléén arbeid verricht als er sprake is van een verplaatsing.
- 30 Houdt de metselaar het touw waaraan de zak met cement hangt, alleen maar vast, dan verricht de spierkracht van de metselaar -ondanks alle inspanning- natuurkundig gezien géén arbeid!"

Met het oog op deze paragraaf formuleerden we een reeks vragen en opdrachten, waaronder de volgende, in opgave 4:

- 4.f. - Betekent volgens jullie "spierkracht" uit regel 5 iets dergelijks als "kracht" uit regel 19? Graag een toelichting.
 - Betekent volgens jullie "afstand" uit regel 6 iets dergelijks als "verplaatsing" uit regel 19? Graag een toelichting.

- Wat is jullie commentaar op de "redenatie" die *Middelink* houdt om van de uitspraak in regel 4 t/m 7 te komen tot de uitspraak in regel 18, 19?

In opgave 5 wordt de aandacht gericht op het verdwijnen van het aspect tijd uit het natuurwetenschappelijk arbeidsbegrip. In opgave 6 wordt de aandacht gericht op andere aspecten van het werk van de metselaar in het dagelijks leven: het touw, vorm en inhoud van de zak, beweging van de zak, plaats van de metselaar op het dak, verschillende methoden om de zak op te hijsen en de motieven van de metselaar om überhaupt een zak cement op te hijsen. Al deze aspecten uit het leven van alledag 'gaan verloren' bij de overgang van een begrip arbeid in het dagelijks leven naar een natuurwetenschappelijk begrip arbeid.

De laatste opdracht uit opgave 6 is de volgende:

- 6.g. Aan het begin van deze opgave deden we de veronderstelling dat er op de weg van een begrip arbeid in de leefwereld naar het natuurkundige begrip arbeid "één en ander verloren gaat".
Wat gaat er zoal verloren?

Amanda en Jack praten over de eerste vraag uit opdracht 4.f.

Protocol 3:

- J ... iets dergelijks als een kracht? Ja natuurlijk!
-
- A Ja, spierkracht is produkt van kracht en verplaatsing, die kracht ...
Ik vin dat hartstikke ...
- 5 J Ja maar ik vind dat spierkracht ... kan je zien als iets dergelijks,
nou wacht even ... nee eigenlijk niet ... toch? Spier ... ja ...
(stilte)
- J maar het gaat toch om de kracht om iets te verplaatsen?
- A Ja.
- 10 J Toch niet dat die kracht óók mee verplaatst dus?
- A Nou ... wat, wat ik hier vind is dat ... hier hebben we telkens van
hij moet die spierkracht uitoefenen en hier hebben we telkens die
.. die kracht doet het! Dàt vin'k het verschil.
- J Ja, ja ik denk dat ze gewoon hier bedoelen dat die persoon in
15 z'n geheel arbeid verricht. Hier moet je denk ik ook niet eh ... te
serieus ingaan op het aspect van ... hij oefent spierkracht uit en
die spierkracht oefent die arbeid uit, daar moet je als het ware
een stap tussen maken. Ze willen hier alleen maar aangeven dat
je dus alleen .. een gròtere spierkracht zwàardere zakken omhoog
20 moet brengen, dat soort dingen.
- A En dan zou het dus wèl hetzelfde zijn?
- J Ik denk het wel.

Een onderscheid tussen een leefwereldbegrip spierkracht en een natuurwetenschappelijk begrip kracht wordt door deze studenten nauwelijks of niet gemaakt. Amanda zegt iets als “spierkracht is gelijk aan kracht in het produkt van kracht en verplaatsing” (regel 3: “spierkracht is produkt van kracht en verplaatsing, *die kracht*”). Jack heeft ergens een 'idee' over een verschil. In het dagelijks spraakgebruik verricht de *statische* persoon (de metselaar blijft op z'n plek!) arbeid en gebruikt hij zijn (spier)kracht om het voorwerp te bewegen, waarbij alleen het voorwerp beweegt maar de kracht niet. In natuurwetenschappelijke taal wordt arbeid verricht door een kracht, *welke tesamen met zijn aangrijpingspunt wordt verplaatst* (Jack: “Toch niet dat die kracht óók mee verplaatst dus?”, regel 10). Amanda is het daar wel mee eens (regel 11-13). Maar Jack beweert dat “je daar niet te serieus op moet ingaan” (regel 15, 16). Immers “*hij* oefent spierkracht uit en *die spierkracht* oefent die arbeid uit” (regel 16, 17). Alhoewel ze even één stap lijken te doen op een weg die kan leiden van een gebeurtenis uit het dagelijks leven naar een natuurwetenschappelijke beschrijving van die gebeurtenis (een proces), namelijk door de spierkracht 'af te splitsen' van de persoon van de metselaar, komen ze toch uiteindelijk weer op hun uitgangspunt terug en besluiten: “En dan zou het dus wèl hetzelfde zijn” (regel 21). Spierkracht en (natuurwetenschappelijke) kracht zijn dus “hetzelfde”. “Arbeid” wordt niet echt gezien als een 'procesgrootheid'.

Hassan en Ronald praten over de laatste vraag uit opdracht 4.f.

Protocol 4:

- R OK, wat is het commentaar op deze redentatie .. beetje wazig he?
(zeer langdurige stilte)
- H Nou ik vi ... hij, hij legt het wel, eh, duidelijk uit vin ik.
- R Ja hij legt het wel duidelijk uit maar ... toch niet helemaal volledig volgens mij ...
- 5 H Maar in bèide gevallen geldt ...
- R want eeh ... hij wil natuurlijk tot die formule komen en om dat een beetje duidelijk te maken .. schetst ie eh ... zo'n voorbeeld van die metselaar .. geeft ie aan als die zak zwaarder ... dan weet
- 10 je gewoon uit ervaring of zo als die zak zwaarder wordt, moet je zwaarder tillen ... en als die afstand ... dus ik vin ... de redenering ... h'm h'm ... dus voor een middelbare schooltje vin ik het dus ... best eh ... dat klinkt eh, klinkt wel goed.
- H Dus voor een middelbare schooltje!
- 15 R Ja, zou wel kunnen ja.
- H Dat vinden wij wel?
- R Ja toch wel, toch wel goed.
- H Ja.

Dezelfde vraag wordt besproken door Jane en Oliver.

Protocol 5:

- J ... want 't is helemaal geen geschikt gekozen voorbeeld ... uiteindelijk.
- O Nee, uiteindelijk ... maar ... uiteindelijk is geen enkel voo ... voo voorbeeld verkee ... geschikt eh gekozen natuurlijk ...
- 5 J Nee maar wat de tijd ...
- O maar hij, hij presenteert hier wel eh 't hier wel eehh .. geschikt ... toch?
- J Jaah ... vind ik wel!
- O Hij presenteert hier alsof 't eehh natuurkundig ko ... ko ... compleet klopt. Maar als je d'r over na gaat denken, is dat helemaal niet waar.
- 10 J Nou dat is gewoon knap van 'm.

Deze studenten hebben enig idee dat Middellink's "redenatie" nog wel wat te wensen overlaat, zonder echter te kunnen aanwijzen wat. Jane en Oliver vinden het "knap" dat hij de indruk wekt alsof alles natuurwetenschappelijk correct is, maar zij suggereren ook dat zij de moeilijkheden wijten aan een verkeerd gekozen voorbeeld. Hassan en Ronald noemen de argumentatie "wazig", maar zeer geschikt voor "een middelbare schooltje" omdat hij "goed klinkt". Ronald plaatst waarschijnlijk zijn vinger op de zere plek wanneer hij zegt: "hij wil natuurlijk tot die formule komen" (protocol 4, regel 7). Alle vier studenten stellen dat Middellink zijn zaak "wel duidelijk" (protocol 4, regel 3, 4) of "wel geschikt" (protocol 5, regel 6) brengt.

Het laatste protocol gaat over opgave 6.g. Felix, Jane, Oliver en Peter praten over "wat er allemaal verloren gaat". Ze zijn zojuist, met oprechte en toenemende verbazing, getuige geweest van het 'verdwijnen' van het touw, de zak, de beweging van de zak, de plaats waar de metselaar zich bevindt, de motieven van de metselaar, en tenslotte van de metselaar zelf.

Protocol 6:

- F ... moe je kijken wat er allemaal verloren gaat!
- O Ho nou es effe.
- F Kortom, alles ...
- O Ja ... maar jij gaat weer veel te snel jij!
- 5 F behalve ... kràcht.
(stilte)
- P Dat zèg je nou wel, maar is dat wel zo?
- J Ja eeew ...
- F Dit is alles wat er verloren gaat behàlve kracht en verplaatsing.

- 10 P Hm, hm. Maar hād ie die?
 O Die had ie niet!
 J Nee!
 (grote hilariteit)
 P Is dat òvergebleven?
- 15 O Nee, dat is d'r bij gekomen! Dus ... alles is verloren gegaan en we hebben d'r wat nieuws voor in de plaats gekregen!
 F Oh!
 O Of eh ... de wereld wordt gewoon helemaal opnieuw geschapen!
 (grinnik)
- 20 P Eh la we zeggen de ... de ...
 O We zijn beter dan God hiermee!
 P de wereld ... de wereld wordt op een àndere manier bekeken.
 F Ja!

Zoals al in de inleiding tot dit protocol is gezegd, veroorzaakt de overgang van de beschrijving van een konkrete situatie en gebeurtenis in het gewone dagelijkse leven naar een systeem en proces in de natuurwetenschappen grote verwondering bij deze studenten. Uiteindelijk 'voelen ze wel zo'n beetje aan' wat er gebeurt, maar alleen als gevolg van zeer gerichte hulp van Peter. Middellink geeft immers niet de minste aanwijzing voor wat er plaatsvindt. Hun oprechte verbazing wordt, naar onze mening, op karakteristieke wijze door Oliver tot uitdrukking gebracht: "De wereld wordt gewoon helemaal opnieuw geschapen! We zijn beter dan God hiermee!"

Interpretatie van deze geprotocolleerde uitspraken

"Arbeid" kan worden gebruikt als *mechanisch arbeidsbegrip* uit de Newtonse mechanica, en als *thermodynamisch arbeidsbegrip*. In beide gevallen wordt "arbeid" 'mathematisch' gedefiniëerd als "het vectorprodukt van één of andere 'kracht' en een 'verplaatsing' van het aangrijppunt van die 'kracht'".

Een verschil tussen deze concepties is het gegeven dat een mechanisch arbeidsbegrip in het algemeen wordt gebruikt voor 'beweging' van een 'systeem' (macroscopisch lichaam) als geheel, terwijl een thermodynamisch arbeidsbegrip in het algemeen wordt gebruikt voor 'beweging' van een wand of van een deel van een thermodynamisch systeem (zoals van een zuiger in een cylinder, of van elektrische lading). Beide arbeidsbegrippen hangen samen met een zeker principe van *behoud* van energie. Alleen in samenhang met het mechanische arbeidsbegrip (niet met het thermodynamische!) wordt echter ook een *energieomzetting*s-principe (bij voorbeeld potentiële energie in kinetische energie en *vice versa*) gebezigd. Een dergelijk energieomzetting(s)principe heeft de klassieke thermodynamica niet nodig omdat daarin *slechts één* energie-

begrip, "thermodynamische inwendige energie", wordt gebruikt. In niet-klassieke, irreversibele thermodynamica wordt mechanische arbeid eenvoudigweg in thermodynamische arbeid 'ingebouwd'.

"Arbeid" wordt ook gebruikt als *dagelijks leven begrip*; als zodanig heeft het een aantal verschillende betekenissen. Eén zeer belangrijke betekenis in het leven van alledag is "inspanning om iets te bereiken, om een prestatie te leveren". Dit arbeidsbegrip is gekoppeld aan "spierkracht", hetwelk kan worden opgevat als "middel om iets te bereiken, om een prestatie te leveren", in het bijzonder als "middel om iets in beweging te krijgen".

Conclusie

Hoewel het moeilijk is "arbeid" als thermodynamisch begrip te onderscheiden van "arbeid" als mechanisch begrip, trekken we uit ons onderzoeksmateriaal de conclusie dat de waargenomen studenten "arbeid" nog altijd gebruiken als (een soort) mechanisch begrip. Deze conclusie is in hoofdzaak gebaseerd op het gegeven dat, naar onze mening, deze studenten een relatie leggen tussen "arbeid" en "warmte" via energie-*omzetting*. Hun mechanisch arbeidsbegrip is echter 'verontreinigd' met elementen die afkomstig zijn van een dagelijks leven begrip arbeid.

We trekken ook de conclusie dat de waargenomen studenten "warmte" gebruiken als een energetisch begrip. We baseren deze conclusie op het gegeven dat we in hun uitspraken zowel "warmtebehoud" als "warmteenergie" aantreffen. Om deze conclusie verder te onderbouwen, hebben we drie methoden voor VWO-scheikunde onderwijs geraadpleegd om enig 'idee' te krijgen van een betekenis van "warmte" die aan deze studenten door het middelbaar onderwijs zou kunnen zijn 'meegegeven'. De betreffende methoden waren CMLS (1983, 1985), Van Keulen, Van Gastel & Smit (1984) en Reiding, Franken & Kabel van de Brand (1986). Dit raadplegen leek onze conclusie in grote lijnen te bevestigen¹⁰: ook hier troffen we aan "warmte is een vorm van energie" en "omzetting" of "omvorming van energie".

Een andere conclusie betreft het 'systematiseren van de werkelijkheid', letterlijk bedoeld als "een procedure om de 'werkelijkheid te vertalen' in één of meer systemen". Volgens onze onderzoeksresultaten waren de waargenomen studenten niet erg vertrouwd met deze procedure. Zij bleven in een dagelijkse leven context: hun 'systemen' bleven materiële objecten. Deze conclusie kan ondermeer worden getrokken uit protocol 1 (het warmereservoir dat een thermostaat blijft) en uit de protocollen 3/4 (de metselaar die een zak ophijst en die, in de uitspraken van studenten,

haast tot aan het bittere einde een metselaar met een zak blijft in plaats van te 'veranderen' in een zich verplaatsende kracht die inwerkt op een puntmassa).

4. Karakteriseren en benoemen van (de) studenten context(en)

Als belangrijk aspect voor het karakteriseren van (de) studenten context(en) zien we de door hen gehanteerde *relatie* tussen "warmte" en "arbeid".

Hoewel er *overeenkomsten* bestaan tussen een calorisch warmtebegrip en een mechanisch arbeidsbegrip (calorisch warmtebehoud is vergelijkbaar met behoud van mechanische energie; omzetting van latente 'caloric' in vrije 'caloric' is vergelijkbaar met omzetting van potentiële energie in kinetische energie), zijn beide concepten principieel gescheiden en niet samenhangend. Ze hebben geen 'gezamenlijke factor' die een relatie legt tussen calorische "warmte" en mechanische "arbeid". Er is geen gezamenlijke context. Zelfs daar waar sprake is van het genereren van mechanische arbeid door calorische warmte (bijvoorbeeld in Carnot's warmtemachines) is het de 'beweging' van de warmtestof die de arbeid genereert. De warmtestof zelf blijft tijdens dit proces onveranderd, omdat 'caloric' immers als onvernietigbaar wordt beschouwd. Er is geen *omzetting* van warmte in arbeid.

Deze situatie is anders voor een energetisch warmtebegrip. In dit geval bestaat er, naast twee afzonderlijke behoudsprincipes (behoud van warmte en behoud van mechanische energie) ook een 'gezamenlijke factor' welke dit warmtebegrip 'koppelt' aan een mechanisch arbeidsbegrip: "energie". "Warmteenergie" en "arbeidsenergie" worden opgevat als verschillende *vormen* van energie. En deze verschillende vormen van energie kunnen in elkaar worden *omgezet*. Energetische "warmte" en mechanische "arbeid" zijn daarom gekoppeld in een gezamenlijke context. We plaatsten hiervoor reeds concepten als "wrijvingswarmte" in een dergelijke context. Omdat, zoals we eerder stelden, deze gezamenlijke context tevens de context is van de calorimetrische thermochemie, een directe voorloper van de klassieke thermodynamica, zullen we deze proto-thermodynamische context voortaan benoemen als "*de thermochemische context*".

Een thermodynamische context is *in zichzelf* een gezamenlijke context van "warmte" en "arbeid". Zij heeft geen 'energievormen' nodig die in elkaar omgezet kunnen worden. De inwendige energie van de klassieke thermodynamica heeft geen 'vormen'. Inwendige energie blijft behouden, maar wordt niet omgezet.

We zien zoveel overeenkomsten tussen de waargenomen studenten-context(en) en een natuurwetenschappelijke context die we hiervoor benoemd hebben als "de thermochemische context" dat we deze studenten-context(en) karakteriseren als thermochemisch.

We zullen daarom deze thermochemische context in ons vervolgonderzoek naar een mogelijke 'onderwijsroute' van contextontwikkeling die in de richting gaat van een thermodynamische basiscontext als vertrekpunt nemen.

Noten

1. De auteurs zijn dank verschuldigd aan prof. dr. H.A.J. Oonk (Vakgroep Grensvlakken en Thermodynamica, Universiteit Utrecht) en dr. H.F. van Sprang (Vakgroep Chemiedidactiek, Universiteit Utrecht) voor het kritisch lezen van en commentaar leveren op het manuscript voor dit artikel, met name op het gebied van interpretaties en conclusies.
2. De auteurs werken samen in de interuniversitaire werkgroep Scheikunde en Onderwijs.
3. Onder "context" van een begrip verstaan we een talige structuur van samenhangende begrippen, die een zekere ('blik' op de) 'werkelijkheid' bepaalt. In dit geval is een thermodynamische context bepalend voor een thermodynamische 'werkelijkheid'. Zonder context blijft een woord niet anders dan een woord; alleen in een context kan het 'uitgroeien' tot een begrip (Martin, 1987).
Met "thermodynamische basiscontext" wordt aangeduid een 'minimum set' van thermodynamische begrippen, nodig als fundament voor de rest van de thermodynamische context.
4. Chemische thermodynamica is een tak van de klassieke thermodynamica die zich in het bijzonder richt op chemische systemen en reacties (processen) en waarin "enthalpie" een voorname rol speelt.
5. Hierbij werd zuiver 'intuïtief' tewerk gegaan: er was nog geen begripsanalyse aan vooraf gegaan.
6. Dat was uiteraard ook het uiteindelijke doel van deze herstructurering.
7. De Nulde Hoofdwet van de Thermodynamica stelt dat als een systeem A in thermisch evenwicht is met een systeem B (in die zin dat er geen verandering optreedt wanneer ze thermisch met elkaar in contact worden gebracht), en als systeem B in thermisch evenwicht is met C, dat dan ook C in evenwicht is met A, ongeacht de samenstelling van de systemen. De Nulde Hoofdwet impliceert het bestaan van een eigenschap die onafhankelijk is van de samenstelling van het systeem en die bepalend is voor het bestaan van een toestand van thermisch evenwicht. We noemen die eigenschap de *temperatuur* van het systeem (Atkins, 1988).
8. Met "thermodynamische zuiger" bedoelen we een voorziening die bestaat uit een cilinder waarin zich een massaloze, wrijvingsloze zuiger vrij kan bewegen.
9. In die tijd was de methode van Middellink de meest gebruikte VWO-natuurkunde methode. Bij latere navraag bleek inderdaad dat ongeveer negen van de tien studenten de tekst "eerder hadden gezien"

10. CMLS (1983, pp. 42, 43): "Warmte, elektrische stroom en licht zijn vormen van energie. Soms kunnen ze elkaar vervangen".
"Er zijn ook reacties waarbij energie vrijkomt, vaak in de vorm van warmte. Dit type reacties noemen we exotherme reacties".
CMLS (1985, p. 10): "In de derde klas hebben we geleerd dat elke reactie een warmte-effect, of algemener een energie-effect heeft".
"Energie kan in verschillende vormen voorkomen, bijvoorbeeld warmte, elektriciteit, licht enzovoort. ... De andere vormen van energie kunnen uiteindelijk ook in warmte omgezet worden".
Van Keulen, Van Gastel & Smit (1984, pp. 10, 11): Hoewel ook andere vormen van energie van belang kunnen zijn, wisselen systemen bij de meeste reacties uitsluitend warmte uit met de omgeving".
"Bij een exotherme reactie verliest het systeem warmte aan de omgeving".
Reiding, Franken & Kabel van den Brand (1986, p.15): "Warmte en arbeid zijn wijzen van energieoverdracht. Warmte is energieoverdracht die plaatsvindt als twee bronnen van verschillende temperatuur met elkaar in contact komen".

Literatuur

- Atkins, P.W. (1988). *Physical Chemistry*. Oxford: Oxford University Press.
- Berg, B.L. (1989). *Qualitative research methods for the social sciences*. Boston: Allyn & Bacon.
- CMLS (1983). *Chemie 3-vwo/havo*. Groningen: Wolters-Noordhoff.
- CMLS (1985). *Chemie 5/6 vwo 1-8*. Groningen: Wolters-Noordhoff.
- Driver, R., E. Guesne & A. Tiberghien (1985). *Children's Ideas in Science*. Milton Keynes: Open University Press.
- Erickson, G.L. (1979). Children's conceptions of heat and temperature. *Science Education*, 63, 221-230.
- Erickson, G.L. (1980). Children's viewpoints of heat: a second look. *Science Education*, 64, 323-336.
- Hamby, M. (1990). Understanding the language: problem solving and the first law of thermodynamics. *Journal of Chemical Education*, 67, 923-924.
- Heath, N.E. (1974). Heating. *Physics Education*, 9, 490-491.
- Kuhn, T.S. (1970). *The Structure of Scientific Revolutions*. Chicago: The University of Chicago Press.
- Mach, E. (1986). *Principles of the Theory of Heat*. Dordrecht: D. Reidel Publishing Company.
- Martin, R.M. (1987). *The Meaning of Language*. Cambridge, Mass.: MIT Press.
- Maso, I. & A. Smaling (1990). *Objectiviteit in kwalitatief onderzoek*. Meppel: Boom.

- Mettes, C.T.C.W. & A. Pilot (1980). *Over het leren oplossen van natuurwetenschappelijke problemen*, Doctoral Thesis. Enschede: University of Twente.
- Mettes, C.T.C.W., A. Pilot, H.J. Roossink & H. Kramers-Pals (1980). Teaching and learning problem solving in science, part I: a general strategy. *Journal of Chemical Education*, 57, 882-885.
- Mettes, C.T.C.W., A. Pilot, H.J. Roossink & H. Kramers-Pals (1981). Teaching and learning problem solving in science, part II: learning problem solving in a thermodynamic course. *Journal of Chemical Education*, 58, 51-55.
- Middelink, J.W. (1978). *Systematische Natuurkunde A (vwo/havo)*. Apeldoorn: Van Walraven.
- Popper, K.R. (1968). *The Logic of Scientific Discovery*. New York: Harper & Row.
- Reiding, J., P.W. Franken & M.A.W. Kabel van den Brand (1986). *Chemie Overal 5v*. Culemborg: Educaboek.
- Roller, D.E. (1950). *The Early Development of the Concepts of Temperature and Heat*. Cambridge, Mass.: Harvard University Press.
- Se-Yuen Mak & K. Young. (1987). Misconceptions in the teaching of heat. *The School Science Review*, 68, 464-470.
- Summers, M.K. (1983). Teaching heat-an analysis of misconceptions. *The School Science Review*, 64, 670-676.
- Terpstra, K.J., H.F. van Sprang & A.H. Verdonk (1989). Hoe warm het was en hoe ver ... Op weg naar warmte als thermodynamisch begrip in 5-vwo? *Tijdschrift voor Didactiek der β -wetenschappen*, 7, 1, 3-26.
- Tisza, L. (1966). *Generalized Thermodynamics*. Cambridge, Mass.: M.I.T. Press.
- Tripp, T.B. (1976). The definition of heat. *Journal of Chemical Education*, 53, 782-784.
- Van Keulen, H.P., L.F.J. van Gastel & R.H. Smit (1984). *Chemie in theorie en praktijk 3v*. 's-Gravenhage: Nijgh & Van Ditmar.
- Van Roon, P.H., H.F. van Sprang & A.H. Verdonk (1992). "Work" and "Heat": on a road towards thermodynamics. *International Journal of Science Education* (geaccepteerd).
- Vegting, P. (1977). Luisterten naar leerlingen V-warmte. *Faraday*, 46, 68-70.
- Warren, J.W. (1972). The teaching of the concept of heat. *Physics Education*, 7, 41-44.
- Zemansky, M.W. (1970). The use and misuse of the word "heat" in physics teaching. *The Physics Teacher*, 8, 295-300.