

## Zijn krachten tweelingen?

C.Hellingman  
CITO, Arnhem

### Inleiding

Wie de literatuur over de didactiek der natuurkunde een beetje bijhoudt kan daarin met een zekere regelmaat artikelen aantreffen die handelen over de problemen en de teleurstellende resultaten van het onderwijs in de elementaire mechanica. Met 'elementair' is hier bedoeld: de mechanica gebaseerd op de eerste drie wetten van Newton, dit jaar precies driehonderd jaar geleden voor het eerst in druk verschenen. Het gaat daarbij vaak nog niet eens over de begripmatig zo moeilijke 'versnelling' bij de eenparige cirkelbeweging, nog minder over de moeilijkheden bij de invoering van 'schijnkrachten' en 'traagheidskrachten'. Alleen al het benoemen van krachten in allerlei alledaagse situaties blijkt een bron van problemen.

Kracht is het centrale begrip in de tweede en derde wet: in de tweede wordt het verband tussen kracht en bewegingsverandering gelegd, in de derde wordt beschreven wat de aard van een kracht is: een werking waaraan een terugwerking gekoppeld is. Het blijkt steeds weer opnieuw dat dit centrale concept zich maar zeer moeilijk tot een bruikbaar en consistent intellectueel hulpmiddel laat omsmeden in de hersenen der leerlingen, en zelfs in die van vele studenten in de exacte vakken. Het gaat hierbij inderdaad om een omsmeden, een 'umlernen' (Redeker, 1984), want een 'straatbeeld' (Lijnse, 1981) van kracht heeft zich bij iedereen gevormd, lang voordat de eerste mechanicales gegeven is. En natuurlijk is juist daarin het grootste deel van de didactische moeilijkheden gelegen; het verlaten van oude, vertrouwde concepten is zeker zo moeilijk als het vormen en toepassen van nieuwe, en in het mechanica-onderwijs moeten beide dingen gebeuren. Een aantal onderzoekers heeft zich op deze problematiek geworpen. In ons land bijvoorbeeld Vegting (1977, 1986), Lijnse (1981) en

Van Genderen (1983), in het buitenland Jung (1979), Driver (1978, 1985), Viennot (1985), Warren (1979), Nachtigall (1985), Terry en Jones (1986), om maar een greep te doen.

### Het probleem

De algemene gedachte is dat het hier gaat om een didactisch probleem, en dat is natuurlijk tot op grote hoogte waar. Maar het is een onderschatting van het probleem om te menen dat de moeilijkheden uitsluitend in de didactiek liggen. Nachtigall (1985) rapporteert over zijn onderzoeksresultaten:

*The analysis of the answers shows that the majority of the students and even of the participating physics teachers had acquired no understanding of Newton's dynamics.*

(onderstreping van mij, C.H.)

In deze harde formulering toch wel een onwaarschijnlijk resultaat. Maar de formulering van Warren (1979) liegt er ook niet om:

*The idea of force is obviously very widely misunderstood, not only by students, but also by highly qualified, mature adults. It is very hard to assess how intrinsically difficult the idea is, since it has been made very much more difficult in practice by the almost incredible confusion of approach, which has continued unchecked by any action by any professional body.*

Warrens boekje, een 'must' voor alle fysici, bevat een appendix met maar liefst negentien onjuiste of half-juiste uitspraken over krachten, gevonden in leerboeken natuurkunde.

Als het zo gesteld is kan men moeilijk anders concluderen dan dat er meer aan de hand is dan alleen een gebrekkige didactiek. Daarvoor zijn schrijvers van leerboeken hun eigen leerjaren te ver te boven. We vragen ons dus met Warren af: hoe intrinsiek moeilijk is het krachtconcept?

### Een stelling

In het volgende zal ik een stelling verdedigen die mogelijk gewaagd aandoet driehonderd jaar na het verschijnen van Newtons wetten:

*de derde wet van Newton geeft een verwarrende beschrijving van het krachtbegrip.*

Met 'verwarrend' is niet bedoeld dat de beschrijving fout zou zijn, in de zin dat het tot inconsistenties moet leiden. Newton zelf en latere onderzoekers hebben er goed mee kunnen werken. Wie, eenmaal voldoende ingewerkt, de beschrijving op de juiste wijze hanteert, kan alle vraagstukken waarin de derde wet een rol speelt op logisch bevredigende wijze oplossen.

Bedoeld is dat de beschrijving de voornaamste oorzaak vormt voor de bovenbeschreven moeilijkheden, en dat er een effectievere beschrijving mogelijk is; dat wil zeggen: een fysisch juiste beschrijving die deze moeilijkheden waarschijnlijk niet oproept. In hoeverre dit laatste waar is zal uit onderzoek moeten blijken. Ik zal de stelling alleen voor het geval van de klassieke mechanica verdedigen.

### Een blik in de historie

Het idee dat krachten altijd in paren voorkomen is een gevolg van de wijze waarop Newton zijn derde wet formuleerde. In de vertaling van H.J.E. Beth (1932):

*'Aan een werking is altijd een terugwerking tegengesteld en gelijk: of de werkingen van twee lichamen op elkaar zijn altijd even groot en hebben tegengestelde richting.'*

Newtons latijnse tekst spreekt over 'actio' en 'reactio'. Zoals bekend worden deze woorden vrijwel altijd met 'actie' en 'reactie' vertaald; maar in het vervolg hoop ik aan te tonen dat deze woordkeuze wel heel erg ongelukkig is. Merkwaardig genoeg komt het woord kracht ('vis') in de wet zelf niet voor; echter wel in de toelichting:

*'Indien een lichaam, tegen een ander lichaam stotend, de beweging hiervan door zijn eigen kracht op enige wijze verandert, dan zal het ook wederkerig in zijn eigen beweging deze zelfde verandering in tegengestelde richting ondergaan door de kracht van het andere lichaam (wegens de gelijkheid der wederkerige drukking).'*

Het is dus duidelijk dat Newton met 'actio' een kracht bedoelde. In de huidige stand van zaken is het zelfs de beschrijving van wat een kracht is; vandaar de stelling dat krachten altijd in paren voorkomen. Maar voor Newton lag dat anders. Want in zijn definities, die hij aan de wetten vooraf laat gaan, onderscheidt hij nog een andere krachtsoort: de aan de materie 'ingeplante kracht' van de traagheid. Zo luidt definitie III:

*'Aan de materie is een kracht ingeplant met het vermogen om weerstand te bieden, waardoor ieder*

*lichaam, voor zover het van het lichaam zelf afhangt, volhardt in zijn toestand van rust of van rechtlijnige eenparige beweging.*

En de toelichting:

*'Deze (kracht) is steeds evenredig met de massa van het lichaam en verschilt, behalve in de wijze van opvatting, in niets van de traagheid der massa. Door de traagheid der materie komt het dat elk lichaam zich moeilijk laat verdringen uit zijn toestand, hetzij van rust, hetzij van beweging. Daarom zou de ingeschapen kracht met de zeer kenschetsende naam traagheidskracht kunnen worden aangeduid. Het lichaam oefent deze kracht alleen uit bij een verandering van zijn toestand, teweeggebracht door een andere op het lichaam aangebrachte kracht; ...'*

Newton kende dus twee soorten krachten (eigenlijk nog meer), waarvan de 'ingeplante kracht' alleen uitgeoefend wordt als een ander lichaam er een 'aangebrachte kracht' op uitoefent. De aangebrachte kracht is een 'actio' en voldoet dus aan de derde wet, maar de ingeplante kracht niet: voor de traagheidskracht is geen 'reactio'. Misschien is dit de reden dat hij het woord kracht vermijdt in de formulering van de derde wet. Daar gaat het voor Newton alleen maar over een bepaald soort kracht. Beth (1932) schrijft:

*'We maken hier nog de opmerking dat het woord 'vis' bij Newton niet door een scherp omljnd begrip gedekt wordt. Hij gebruikt het woord in zeer vage zin en in zeer sterk van elkaar onderscheiden betekenis. De 'vis impressa' is voor hem het begrip dat met ons begrip van kracht samenvalt; echter duidt hij later wel met de benaming 'vis motrix' hetzelfde aan. De 'vis insita' of de 'vis inertiae' waren geen krachten in de betekenis die wij aan dat woord hechten.'*

En hij voegt er als noot aan toe:

*'Hiermede is niet in strijd dat wij ons ook thans nog wel van de term traagheidskrachten bedienen.'*

Maar als we ons ook thans nog van begrippen als traagheidskracht en schijnkracht bedienen, zijn wij ons dan wel bewust dat hierbij niet voldaan is aan Newtons derde wet, zodat kennelijk toch niet alle krachten in paren voorkomen?

Bij schijnkrachten is de situatie nog ernstiger. Deze worden ingevoerd in het geval van eenparig roterende lichamen waarop voorwerpen in rust zijn of bewegen ten opzichte van een meerote-

rende waarnemen die zich op het verbazingwekkende standpunt stelt dat hij zich in een inertiaalstelsel bevindt. Om de waargenomen versnellingen (centrifugaal en/of coriolis-) te kunnen 'verklaren' voert hij schijnkrachten in, kennelijk om aan de tweede wet van Newton te voldoen. Maar waarom zou hij wel aan de tweede wet willen voldoen, en niet aan de derde? Zulk soort vragen worden bij mijn weten niet gesteld, laat staan opgelost.

Warren schrijft dan ook

*'If the reader has a colleague who insists on teaching that there is a centrifugal force acting on a circulating body in uniform circular motion, he could ask the following questions.*

*Is the force real or imaginary?*

*Is the observer an inertial observer?*

*Which of Newton's laws of motion apply?*

*If Newton's third law applies, which force is the 'partner' to the centrifugal force?*

*Where in the body does the force act?*

*Are there any consequent forces acting on any other body?*

*Would there be a similar force acting on a body that is accelerating in a straight line?*

*It would be interesting to observe his reaction.'*

Vegting (1986) schrijft op grond van een onderzoek bij haar leerlingen

*'.... dat leerlingen krachten localiseren in objecten: kracht van het water, kracht van de spieren, in plaats van iets dat een werking uitoefent op een voorwerp: de kracht op het waterrad, respectievelijk de kracht op de gewichten. Uit de geschiedenis der natuurwetenschappen weten we dat dergelijke opvattingen vòòr Newton de fysica hebben beheerst.'*

Op grond van Newtons eigen visie en de gesignaleerde huidige verwarring moeten we constateren dat het krachtbegrip nog steeds enigszins op de tocht staat. Enerzijds heeft men gekozen voor kracht als een werking, in de zin van Newtons derde wet; anderzijds wordt deze keuze niet consequent doorgevoerd. Daarmee zijn we niet losgekomen van het begrip kracht als iets dat bij één

enkel object hoort. Weliswaar localiseren we de kracht niet meer in een object, maar wel als een werking op een enkel object: de kracht op het waterrad, de kracht op het gewicht. Zo heeft Newton het bedoeld in zijn derde wet en zo hebben wij het geleerd. Maar dat versluiert de andere invalshoek om naar krachten te kijken: de kracht tussen het water en het rad, de kracht tussen het gewicht en de hand; kracht als een wisselwerking tussen twee objecten.

### Actie en reactie

Terry en Jones (1986) vroegen in een onderzoek bij 16-jarige leerlingen die een 0-level curriculum in natuurkunde doorlopen hadden om de reactiekracht te noemen die volgens de derde wet van Newton behoort bij de zwaartekracht op een persoon die op de grond staat. Niet meer dan 2 van de 39 ondervraagde leerlingen waren in staat om het juiste antwoord te geven: de kracht die de persoon op de aarde uitoefent.

Bij een analyse van het gestelde probleem moeten we constateren dat het om een eenvoudig probleem gaat: de oplossing ervan vereist niet meer dan rechtstreekse toepassing van een bekende wet. Bovendien gaat het om een probleem dat nauw aansluit bij de belevingswereld van de leerlingen; het kan niet alledaagser. En tenslotte is het waarschijnlijk te noemen dat de meeste leerlingen in voorafgaand onderwijs met dit of een vergelijkbaar probleem geconfronteerd zijn geweest; een 'reproductievraag' dus. En toch. Waar zit de bottle-neck? Die zit in het begrippenpaar actie en reactie. Deze begrippen zijn bij de leerlingen goed bekend vanuit de leefwereld, waar ze immers ook gebruikt worden. Een reactie: iets wat volgt op en plaats vindt ten gevolge van een gebeurtenis, een actie. Maar de aansluiting naar de fysica is uiteraard verkeerd: waar tijdsverschil, hoe klein ook, essentieel is voor het begrippenpaar in het dagelijks leven daar is gelijktijdigheid essentieel voor dezelfde begrippen in de natuurkunde. De leerling wordt hier dus voor een valkuil geplaatst.

Maar als we die valkuil hebben kunnen omzeilen komen we pas aan de echte booby-trap. Want wat is er, vanuit het 'straatbeeld' gezien, een perfecter voorbeeld van een reactie op de zwaartekracht dan de kracht die de vloer op de persoon uitoefent? Als de zwaartekracht er niet was zou de vloer immers ook geen kracht hoeven uitoefenen? De kracht van de vloer is er dus ten gevolge van de zwaartekracht, precies zoals we dat verwachten vanuit ons idee van wat een reactie is. Bovendien voldoet deze kracht nog aan de eisen dat hij even groot is als en tegengesteld gericht aan de zwaartekracht op de persoon in kwestie. (We zien even, met de

leerlingen, voorbij aan de eis dat de gezochte kracht op een ander lichaam moet werken). Maak dan de leerlingen maar eens wijs dat dit niet de kracht is als bedoeld in Newtons derde wet. Daar kan geen didactiek tegenop.

Natuurlijk, een aantal leerboeken wijst erop dat bij krachten actie en reactie gelijktijdig zijn. Maar het is de vraag op dat veel helpt. Vertrouwde concepten laten zich moeilijk verdringen.

Tenslotte hebben we nog het feit dat het woord actie in het dagelijks leven altijd gekoppeld is aan beweging, iets dat gebeurt. In het voorbeeld van de persoon die op de grond staat, eigenlijk in alle voorbeelden uit de statica, is daar geen sprake van. De werking van de gravitatie wordt niet als een 'actie' gevoeld. Zo'n beschrijving, vaak relevant in dynamische situaties, mist hier volledig zijn doel.

#### Kracht: een eenzijdig of een tweezijdig verschijnsel?

De termen 'actie' en 'reactie' zijn dus wel buitengewoon ongelukkig. Men zou dan kunnen overwegen om ze te vervangen door de termen van Beth: werking en terugwerking.

Maar de moeilijkheden liggen waarschijnlijk dieper. Want door te verklaren dat krachten altijd in paren optreden worden de krachten waarmee de leerlingen uit ervaring vertrouwd zijn ineens van een soort tweelingbroertjes voorzien. Dat is vreemd! Want nu moet bij iedere kracht, als één ervaren, een broertje aangewezen worden, even groot, maar tegengesteld gericht. Dat kan wel eens even zoeken zijn, want het broertje is conceptueel losgekoppeld van de gegeven kracht, die beschreven of gedacht is als een eenzijdig verschijnsel. In het geval van het besproken voorbeeld is het gauw genoeg gevonden: de kracht van de vloer op de persoon; en dit antwoord wordt dan ook door twee-derde van de leerlingen gegeven (en door hoeveel afgestudeerden?). Maar het is onjuist; zoals we kunnen inzien door de persoon op een valluik te zetten dat plotseling open klapt: met de persoon verdwijnt tegelijk het broertje.

Het probleem bij het vinden van het goede antwoord wordt ongetwijfeld veroorzaakt door de wijze waarop we de zwaartekracht beschrijven, namelijk als een kracht op de persoon; dus niet als een kracht tussen de persoon en de aarde. Daarmee is de aarde als het ware uit het beeld verdwenen en komt er, door de boven beschreven valkuilen, niet gemakkelijk weer in terug. Kracht wordt dus in verband gebracht met één object, zodat de symmetrie die de kern van Newtons derde wet vormt verhuld wordt. Zelfs als de zwaartekracht beschreven wordt als de kracht van de aarde op de

persoon (zodat de aarde niet uit de beschrijving verdwijnt) wordt de symmetrie van het verschijnsel kracht niet adequaat weergegeven, nog afgezien daarvan dat we weer terug zijn bij de vóór-Newtonse opvatting zoals beschreven door Vegting: de kracht van de aarde; m.a.w. de kracht wordt gelocaliseerd in het object.

Er is maar één manier om recht te doen aan de symmetrie van het verschijnsel kracht, en dat is de beschrijving van kracht als een interactie, een wisselwerking. En deze term ziet men dan ook steeds opduiken in de beschrijvingen van de theoretische fysici in hun pogen om de thans bekende krachten onder één noemer te brengen: 'sterke interactie' als het over kernkrachten gaat, 'zwakke interactie' voor gravitatiekracht. Kernkrachten zijn krachten tussen kerndeeltjes; de broertjes spelen geen rol meer, want het behoort tot de essentie van een interactie of wisselwerking om naar twee kanten te werken. Een wisselwerking is in de Newtonse mechanica een werking tussen twee materiële lichamen, en dus zijn er bij iedere wisselwerking twee lichamen betrokken. M.A.W. als een kracht een wisselwerking is zijn er bij iedere kracht twee lichamen betrokken. Dat is iets anders dan: bij iedere kracht hoort een tegenkracht. Het 'andere' is eigenlijk niets meer dan een verandering van de optiek, van de invalshoek waaronder we naar het fenomeen kracht kijken: niet één van de lichamen, maar de kracht zelf komt centraal te staan.

Samenvattend: het huidige concept beschrijft een kracht als werkend op één lichaam en gepaard aan een andere kracht, werkend op een ander lichaam: het interactie-concept beschrijft een kracht als een wisselwerking tussen twee lichamen.

### Een voorstel

In hun bespreking van de moeilijkheden rond de derde wet stellen Terry en Jones (1986) dat naast de woorden actie en reactie, ook de uitdrukking 'tegengesteld gericht' problemen kan veroorzaken. Deze zou suggereren dat de actie en de reactie op hetzelfde lichaam werken, en op deze manier verward worden met een evenwichtsvoorwaarde. Zij vervolgen:

*'So to present the third law in an intelligible way, we should avoid the words 'action', 'reaction' and 'opposite' and instead provide a fuller and more meaningful statement of the law.'*

Zij doen echter geen voorstel voor een nieuwe formulering. Het mijne luidt als volgt:



*Een kracht is een wisselwerking tussen twee lichamen. Deze wisselwerking is op ieder lichaam even groot, maar tegengesteld gericht.*

De formulering verschilt niet eens erg veel met de oorspronkelijke van de hand van Newton. Het is zelfs mogelijk om Newtons eigen toelichting te handhaven:

*‘Al wat iets anders trekt of drukt, wordt evenveel getrokken of gedrukt door dat andere. Als men een steen duwt met zijn vinger, wordt de vinger ook geduwd door de steen. Als een paard een steen trekt, vastgebonden aan een touw, zal het paard even sterk teruggetrokken worden naar de steen; want het touw, dat naar beide kanten gespannen is, streeft ernaar weer slap te worden en trekt daardoor het paard even sterk naar de steen als de steen naar het paard, en het zal het ene even sterk achteruit trekken als het andere vooruit.’ (etc.)*

(De vertaling is van Ziggelaar (1971)).

Het gaat voornamelijk om een andere invalshoek, een andere wijze van benaderen van het krachtbegrip. Aan de wens van Terry en Jones om ook het begrip ‘tegensgesteld gericht’ te omzeilen is niet voldaan. Ik twijfel aan de noodzaak en aan de haalbaarheid ervan.

Hoeveel vruchten in didactisch opzicht afgeworpen worden door de hier voorgestelde herformulering kan alleen bepaald worden door onderzoek. Terugkijkend naar het voorbeeld van de zwaartekracht op de persoon moeten we constateren dat de vraag naar de reactiekracht in de nieuwe benadering niet zinvol meer gesteld kan worden. ‘Reactiekracht’ komt in het vocabulair niet meer voor. Er kan slechts gevraagd worden tussen welke massa’s of lichamen de zwaartekracht werkt die de persoon ondervindt. Het lijkt mij erg onwaarschijnlijk dat bij die vraag een meerderheid der leerlingen tot een foutief antwoord zou komen. Als dat zo is hebben we minstens één aanleiding voor de volgende suggestie aan didactische instituten:

ontwikkel een lespakket dynamica/statica waarin kracht beschreven wordt volgens het interactie-concept en waarin tekst en opgaven in overeenstemming daarmee geformuleerd zijn. Herhaal vervolgens één of meer van de onderzoeken waarvan sprake is in de inleiding van dit artikel.

Literatuur

- Beth, H.J.E. **Newtons Principa**, Groningen: Noordhoff, 1932.
- Driver, R. Cognitive psychology and pupils' frameworks in mechanics. In: P.L.Lijnse (Ed.). **The many faces of teaching and learning mechanics**, Utrecht: W.C.C., 171-198, 1985.
- Genderen, D. van. Kracht en tegenkracht, actie en reactie, **Tijdschrift voor Didactiek der Natuurwetenschappen**, 1, 1, 48-61, 1983.
- Lijnse, P.L. Schoolbeeld of straatbeeld: over onderzoek naar begripsmoeilijkheden van leerlingen bij het leren van mechanica. In: **Verslag van de Woudschotenconferentie**, Utrecht: Werkgroep Natuurkunde-Didactiek.
- Nachtigall, D. Misconceptions in physics and a strategy to overcome them. In: P.L.Lijnse (Ed.). **The many faces of teaching and learning mechanics**, Utrecht: W.C.C., p.299, 1985.
- Redeker, B. The difference between the lifeworld of children and the world of physics; a basic problem for teaching and learning mechanics. In: P.L.Lijnse (Ed.). **The many faces of teaching and learning mechanics**, Utrecht: W.C.C., 90-95, 1985.
- Terry, C. & Jones, G. Newton's third law and conceptual change, **European Journal of Science Education**, 8, 291-298, 1986.
- Vegting, P. Kracht, een moeilijk begrip, **NVON-maandblad**, 11, 11, 26-31, 1986
- Viennot, L. & Saltiel, E. What do we learn from similarities between historical ideas and the spontaneous reasoning of students. In: P.L.Lijnse, (Ed.). **The many faces of teaching and learning mechanics**, Utrecht: W.C.C., 199-214, 1985.
- Warren, J.W. **Understanding force**, London: John Murray, 1979.
- Ziggelaar, A. **Bronnen der Natuurkunde**, Groningen: Wolters Noordhoff, 1971.