

Commentaar

Newton 3: de woorden en de beelden

D. van Genderen
CD- β , Vakgroep Natuurkunde-Didactiek
Rijksuniversiteit te Utrecht

Summary

In the previous issue of this journal Hellingman attempts to explain the peculiar fact that even many physicists fail to understand fully Newton's third law. The root of the problem, in his view, is Newton's original formulation in terms of 'action' and 'reaction'.

In my view, the main difficulty lies not in the words, but in the images. It is hard to imagine, given our intuitive ideas about 'force', that even very unequal partners - big and small, or hard and soft, or moving and stationary, etc. - exert equal forces on each other. Suggestions are given for experiments, examples and questions to stimulate discussion and understanding of the law in a variety of contexts.

1. Inleiding

Droevig is het nog steeds gesteld met het begrip van Newton's derde wet, zelfs bij vele natuurkundigen, onder wie leraren en leerboekschrijvers. Dat constateert Hellingman in het vorige nummer van dit tijdschrift, op grond van treffende en minder treffende voorbeelden¹.

Als oorzaak van het onbegrip ziet Hellingman vooral het gebruik van Newton's formulering:

Aan een actie is altijd een reactie tegengesteld en gelijk, of de werkingen van twee lichamen op elkaar zijn altijd even groot en tegengesteld gericht².

Hij stelt een nieuwe formulering voor:

Een kracht is één zijde van een wisselwerking tussen twee lichamen. De wisselwerking is op ieder lichaam even groot maar tegengesteld gericht.

Ten dele ben ik het eens met Hellingman: de term wisselwerking verdient de voorkeur, fysisch beschouwd. De krachtwerking is altijd volstrekt *symmetrisch*; er is geen reden de ene kracht 'actie' te noemen en de andere 'reactie'.

Maar wacht even: wat we van een wisselwerking waarnemen is vaak *asymmetrisch*. Zie de steen die de ruit verbrijzelt, de magneet die het spijkertje naar zich toe trekt, de raket die een straal gas uitstoot, de atleet die een speer werpt. Met het visuele beeld van die ongelijke partners verbonden zijn *denkbeelden*³ van wat er gebeurt en waarom: ik 'zie' dat een sterke partner een zwakke overheerst en een eventuele tegenwerking overwint (Van Genderen, 1983, 1989).

Bij de genoemde voorbeelden is het voor de leerlingen allerminst 'logisch' dat de twee krachten *even groot* zijn. Dat probleem blijft bestaan wanneer we de formulering van Hellingman gebruiken. Daarom moeten we ook op de voorbeelden letten waarmee de wet wordt geïllustreerd: ziet de leerling wel wat wij zien?

2. Eenzijdige contextkeuze: evenwichtssituaties

De formulering van de derde wet in de leerboeken verdient kritische beschouwing, maar evenzeer de beeldvorming door de keuze van de *contexten*, d.w.z. de situaties waarop de wet wordt betrokken. Van speciaal belang zijn de situaties die als aanleercontext dienen en die daarbij in figuren worden uitgebeeld. Veelal bevat zo'n figuur al meteen de interpretatie, doordat de krachten met even grote pijlen zijn aangeduid.

In het lange tijd dominerende leerboek van Schweers en Van Vianen (1957, 19e druk 1970) zien de leerlingen als eerste voorbeeld een hand die tegen een wand duwt (fig. 1). Waarom de twee krachten gelijk zijn wordt niet uitgelegd; meegedeeld wordt dat de wet experimenteel niet rechtstreeks te bewijzen is, maar dat tal van gevolgtrekkingen wel te verifiëren zijn. Daarbij wordt verwezen naar een paragraaf over botsingen, maar die staat een eind verderop.

Het risico is aanwezig dat de leerling een eigen "bewijs" hecht aan de situatie van figuur 1: er is evenwicht en *daarom* zijn de krachten gelijk. Dat kan leiden tot een volgend misverstand: bij niet-evenwicht, als de wand bezwijkt, zijn de krachten niet gelijk. Het risico is in het geheel herziene leerboek (Schweers & Van Vianen, 1971) nog vergroot door figuur 2.

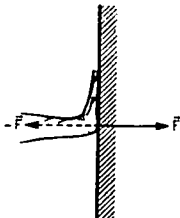


Fig.1. (Schweers & Van Vianen, 1957)

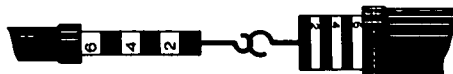


Fig.2. (Schweers & Van Vianen, 1971)

Wel waarschuwt nu de tekst voor "een wel eens gemaakte denkfout":

actie en reactie zijn even grote maar tegengestelde krachten, *dus* heffen ze elkaar op. Pas op: twee even grote maar tegengestelde krachten die op *hetzelfde* voorwerp worden uitgeoefend, heffen elkaar op. Maar actie- en reactiekracht worden altijd op twee *verschillende* voorwerpen uitgeoefend: daarom kunnen ze elkaar niet opheffen.

Het effect van zo'n vermaning is twijfelachtig. We hoeven maar een subtiële verandering aan te brengen in figuur 2 - bv. een ringetje tussen de haakjes - om de twee krachten op hetzelfde voorwerp te laten werken.

De kans op verwarring wordt nog vergroot door een factor die Hellingman ook wel onderkent: "het weinige gebruik dat van de derde wet wordt gemaakt". De wet kan gemakkelijk vervagen tot "o, ja, iets met gelijke krachten", met als meest voor de hand liggende associatie "twee krachten die evenwicht maken".

De meest ernstige vorm van verwarring is dat de derde wet 'gezien' wordt als een evenwichtsregel, zoals in het door Hellingman geciteerde leerboek voor mavo/lbo en in zijn onderzoek onder Belgische leraren. Een lichtere variant is dat de wet correct wordt geciteerd, maar voorzien van de voorwaarde dat de twee lichamen in rust moeten zijn. Die variant ben ik zelfs bij natuurkundestudenten herhaaldelijk tegengekomen en ook wel in leerboeken voor mavo (bv. Langras e.a., 1990).

3. Eenzijdige contextkeuze: gelijke partners

In het boek van Middellink (1978), in de jaren tachtig het meest gebruikte, zien de leerlingen als eerste voorbeeld een botsingsexperiment met twee *gelijke* bollen van *gelijke* massa (fig.3). In de tekst wordt de gelijkheid van de krachten zelfs expliciet gekoppeld aan de gelijkheid van de massa's. Het volgende beeld is dat van twee magneten die er gelijk uitzien (fig.4); of ze gelijk (moeten) zijn wordt in de tekst niet vermeld.

Met de algemene geldigheid van de derde wet heeft Middellink het zelf moeilijk, zoals blijkt uit de door Hellingman geciteerde passage over twee stroomvoerende geleiders. Naar mijn interpretatie is de fout niet te verklaren uit de *woorden* actiekracht en reactiekracht, maar uit de *beelden*: de symmetrie in krachtwerking lijkt niet te stroken met asymmetrie in draadlengten.

De herziene versie van Middellink (1990) begint met twee voor het oog gelijke magneten op de sleetjes van een luchtkussenbaan (fig.5). Wel vermeldt nu de tekst dat de krachten ook gelijk zijn wanneer de ene magneet sterker is dan de andere. Het voorbeeld van de botsende kogels (fig.3) is gebleven, maar de toelichting is gewijzigd: ze geeft niet duidelijk aan of de massa's gelijk moeten zijn.

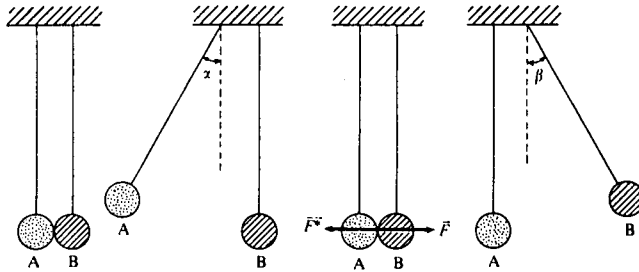


Fig.3. (Middelink, 1978, 1990)

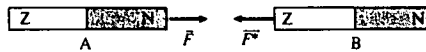


Fig.4. (Middelink, 1978)

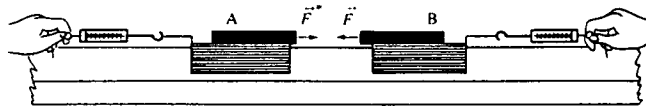


Fig.5. (Middelink, 1990)

Onbevredigend blijft, ook in andere leerboeken, dat aan de leerlingen het probleem wordt overgelaten van gelijke krachten tussen ongelijke partners - het in de inleiding genoemde conflict tussen symmetrie en asymmetrie. Ik kom daar straks op terug.

4. Voorbeelden, proeven en formuleringen van Newton

Hellingman kritiseert Newton's formuleringen, maar zou zijn voorbeelden wel in de leerboeken willen zien. De twee voorbeelden die hij citeert lijken me echter de minst geschikte. Aan het voorbeeld van de vinger die tegen een steen duwt kleeft hetzelfde bezwaar als aan het voorbeeld van de hand die tegen een wand duwt (fig. 1). In het voorbeeld van een paard dat een steen trekt verloopt de krachtwerking via een touw; er zijn dus twee actie-reactieparen.

Veel spreker zijn de *proeven* die Newton een eindje verderop in de Principia bespreekt (Cajori, 1966, p.22 e.v.).

Hij onderzoekt botsingen tussen *ongelijke* partners: bollen van ongelijke grootte (figuur 6), ongelijke massa en ongelijk materiaal (staal, kurk, glas,

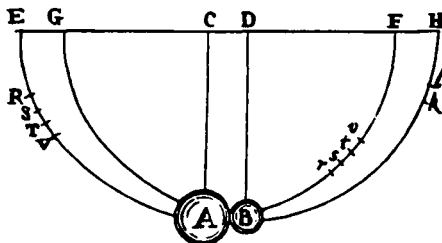


Fig.6. (uit Newton's Principia)

zelfs samengeperste wol). Hij bespreekt uitvoerig de opzet, o.a. de manier waarop hij met de luchtweerstand rekening houdt. Zijn conclusie is dat de "veranderingen van de beweging" (impulsveranderingen) gelijk zijn en dus, volgens de tweede wet, ook de krachten.

Ook een tweede proef betreft *ongelijke* partners: een magneet en een stuk ijzer in twee "vessels" (niet nader omschreven) die in water drijven. De twee lichamen komen bij elkaar en blijven dan verder in rust⁴. Als de krachten ongelijk waren, zegt Newton, zouden de twee lichamen samen in beweging blijven, in strijd met de eerste wet.

Aansluitend bespreekt Newton een gedachtenproef: hij verdeelt de aarde in ongelijke stukken, door middel van een denkbeeldig scheidingsvlak, en beschouwt de krachten die deze stukken op elkaar uitoefenen. Ongelijkheid van actie en reactie zou in strijd zijn met de eerste wet.

Newton maakt hiermee duidelijk hoe algemeen en fundamenteel de derde wet is en hoe wezenlijk ze samenhangt met de eerste en de tweede. Inwendige krachten - krachten tussen de delen van een lichaam - kunnen de snelheid van een lichaam als geheel (d.w.z. de snelheid van het zwaartepunt) niet veranderen⁵. En dus gaat het in $F = ma$ alleen om de uitwendige krachten. In onze schoolboeken ontbreekt meestal deze terugkoppeling van de derde wet naar de eerste en de tweede.

Hellingman hecht veel belang aan het gegeven dat Newton ook een ander krachtbegrip hanteert: de 'inherente' kracht van een bewegend lichaam. Dat is het middeleeuwse idee van de 'impetus' die een lichaam, bv. een weggeschoten pijl, in beweging houdt zonder dat er een uitwendige kracht op werkt (Dijksterhuis, 1950). Dat komt overeen met wat veel leerlingen denken (Viennot, 1979) en dit denkbeeld zou ook bij botsingsproeven (fig. 3; fig 6) kunnen optreden: de bewegende bol *heeft* 'kracht' en draagt die 'kracht' geheel of gedeeltelijk over aan de stilstaande.

Vervangen we hier 'kracht' door impuls, of door kinetische energie, dan

krijgen we natuurkundig juiste uitspraken. Het grote didactische probleem in de mechanica is de ontwikkeling van het intuïtieve begrip 'kracht' tot de fysisch verschillende en streng vastgelegde begrippen kracht, arbeid, vermogen, stoot, impuls, kinetische energie en potentiële energie⁶. Dat probleem blijft onverminderd bestaan bij een andere formulering van de derde wet.

5. Formuleringen in de leerboeken

In de meeste leerboeken voor vwo en havo worden weliswaar de termen actie en reactie gebruikt - ze staan ook in de examenprogramma's - maar de schrijvers doen hun best om misverstand te voorkomen. Bijvoorbeeld Biezeveld en Mathot (1990):

Een kracht komt nooit in zijn eentje voor maar is altijd de helft van een tweeling....Actie/reactieparen hebben niets met evenwicht te maken... Actie en reactie vormen een tweeling en werken op verschillende voorwerpen.

Een citaat uit het boek dat Interactie als titel voert (PLON-vereniging, 1990):

Alle krachten komen in paren voor, ook de zwaartekracht. Als de aarde een kracht uitoefent op een voorwerp, oefent dat voorwerp een (even grote, tegengestelde gerichte) kracht uit op de aarde.

Een voorbeeld uit een ouder boek (Jardine, 1966) dat sterk doet denken aan wat Hellingman bepleit:

[na een inleidend experiment] Daarom is het beter kracht op te vatten als een *wisselwerking* tussen twee lichamen dan actie en reactie op te vatten als twee aparte krachten. Deze wisselwerkingskracht werkt even sterk in tegengestelde richtingen en 'actie' en 'reactie' zijn slechts namen om ze aan te duiden. Daar ze *tezamen* werken moeten ze niet opgevat worden als oorzaak en gevolg.... Newton zelf maakte dit punt duidelijk toen hij de planeten besprak. Hij zei: 'het is niet één werking waardoor de zon Jupiter aantrekt en een andere werking waardoor Jupiter de zon aantrekt, maar het is *één werking* waardoor de zon en Jupiter wederzijds proberen elkaar te naderen'.

Een enkel boek (Hogenbirk e.a., 1991) gaat nog verder: het laat de termen actie en reactie achterwege en spreekt van de wisselwerkingswet.

Wat zou er gebeuren als alle leerboeken de door Hellingman voorgestelde formulering zouden overnemen? Ik vrees dat er ook dan nog een grote discrepantie zou blijven tussen wat onderwezen en wat geleerd wordt. Uit tal van onderzoekspublicaties blijkt dat de intuïtieve denkbeelden van de leerlingen over bewegingen en krachten niet als sneeuw voor de zon wegsmelten bij de kennismaking met de wetten van Newton.

6. Onbegrip bij leerlingen en leraren

Het lijdt voor mij geen twijfel dat veel leerlingen die in de bovenbouw havo/vwo de mechanica 'gehad' hebben, de derde wet niet beheersen. Maar tussen volledig onbegrip en volledig begrip liggen vele nuances: het percentage goede antwoorden hangt sterk af van de probleemsituatie die we aan de leerlingen voorleggen. De volgende voorbeelden zijn ontleend aan eigen onderzoek (1983); in sommige vragen werd rechtstreeks gevraagd naar de grootte van de twee krachten, in andere indirect (bv. indeuking van twee botsende auto's).

- "Twee schaatsers die even zwaar zijn staan eerst stil op het ijs. Op een bepaald moment geeft de linker schaatser de rechter een duw". (Figuur 7; indirecte vraag over de afgelegde afstand na 2 seconden; 91% van de leerlingen in 4 vwo tekent gelijke afstanden.)
- "Twee karretjes die aan elkaar gekoppeld zijn kunnen wrijvingsloos over een horizontale rijbaan bewegen". (Figuur 8; indirecte vraag: gaan ze na loslaten naar rechts rijden, niet rijden of naar links rijden? Niet rijden volgens 88%; met juiste motivering 59%).
- "Een auto botst frontaal tegen een stilstaande auto van hetzelfde type". (Figuur 9; 52% zegt dat de indeuking van beide auto's even groot is).
- "Een grote en een kleine magneet liggen met de noordpolen naar elkaar toe, zodat ze elkaar afstoten". (Figuur 10; 31% geeft aan dat de krachten gelijk zijn).
- "Bij het kogelstoten oefen ik met mijn hand een kracht uit op de kogel". (34% zegt dat de kogel een even grote kracht op mijn hand uitoefent.)



Fig.7 (Van Genderen, 1983)

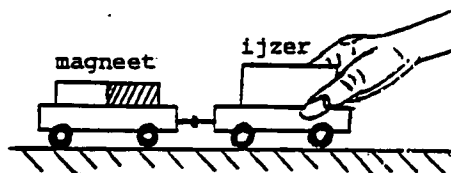


Fig.8 (idem)



Fig.9 (idem)



Fig.10 (idem)

Naar mijn interpretatie zijn de verschillen in de scores grotendeels te verklaren uit intuïtieve denkbeelden: welke kracht 'wint het' van de andere?

Voor goed opgeleide natuurkundeleraren zouden deze vragen geen moeilijkheden mogen opleveren, maar dat heb ik niet onderzocht. Hopelijk geldt hier het klassieke 'docendo discimus': we realiseren ons pas goed wat de derde wet inhoudt wanneer we haar aan anderen moeten uitleggen. Volgens mijn herinnering heb ik als leraar minder geleden aan fysisch dan aan *didactisch* onbegrip: onbegrip voor de denkbeelden van leerlingen en voor de mate waarin deze denkbeelden verankerd zijn in alledaagse ervaringen, omgangstaal en 'common sense'.

7. Suggesties voor de onderwijspraktijk

Het zal duidelijk zijn dat ik geen wonderen verwacht van een andere formulering van Newton's derde wet. Wel zou ik de verkorting tot "actie is min reactie" graag zien verdwijnen, want die bevordert alleen maar slordig denken en verwarring met " $\Sigma F = 0$ " bij evenwichtssituaties. Trouwens, de toepassing van de derde wet op evenwichtssituaties (hand tegen wand e.d.) is relatief onbelangrijk en bovendien oninteressant.

Wel belangrijk en interessant is de wisselwerking tussen twee magneten, verhelderend ook, omdat het hier duidelijk gaat om twee krachten die op verschillende lichamen werken. Bij twee gelijke magneten (vraag voor later: hoe controleer je dat ze gelijk zijn?) is de gelijkheid van de krachten voor de leerlingen vanzelfsprekend, bij ongelijke magneten of een magneet en een stuk ijzer duidelijk niet. Er zijn verschillende mogelijkheden om dit probleem letterlijk ter tafel te brengen, bv. de proefopstelling van figuur 5, of de proef van Newton, of de opstelling van figuur 8.

Een aardige en leerzame 'overbrugging' tussen symmetrische en asymmetrische situaties is aangeduid in figuur 11. Van drie gelijke magneten zijn er twee samengevoegd: wat kun je zeggen over de krachten die op de dubbele en op de enkele werken?

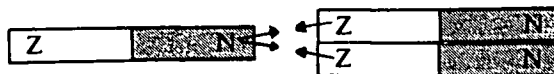


Fig.11. 'Overbrugging' tussen symmetrische asymmetrische situatie

Een overeenkomstige 'overbrugging' is mogelijk bij elektrische krachten en bij gravitatiekrachten. De maan wordt aangetrokken door de aarde, die een 80 maal zo grote massa heeft. Volgt daaruit dat "de kracht van de aarde" op de maan" 80 maal zo groot is als "de kracht van de maan op de aarde"?

Laten we de aarde eens beschouwen als een samenklontering van 80 manen, enz.

Zou dit helpen om de derde wet van Newton voor leerlingen aannemelijk te maken? Empirisch beproefd en bewezen is het niet, maar het lijkt mij de moeite van het proberen en onderzoeken waard. Datzelfde geldt voor de suggesties die volgen.

De vraag over botsende auto's (fig. 9) kan dienen om het onderscheid 'bewegend-stilstaand' ter discussie te stellen. In modelexperimenten (wagentjes met kreukzones) zijn de indeukingen te controleren. Is eenmaal het accent verlegd naar de relatieve snelheid en naar de contactzones, dan is het beter voorstelbaar dat de krachten gelijk zijn, ook bij een botsing tussen ongelijke partners.

De vraag over de schaatsers kan dienen om denkbeelden over 'actief-passief' in discussie te brengen. Misschien komen leerlingen met het argument dat de duwer wel "kracht levert" en de geduwde niet. Dat is dan een goede aanleiding om het onderscheid tussen omgangstaal en vaktaal te bespreken: de duwer verricht de arbeid en levert de energie.

Discussie over de situatie in figuur 8 biedt een mogelijkheid om verband te leggen tussen de derde wet en de eerste, zoals Newton zelf deed. Beschouwen we de twee wagentjes als één lichaam, dan hebben we te maken met inwendige krachten, die de beweging van het geheel niet kunnen beïnvloeden. En zo iets geldt ook voor de inwendige krachten in ons eigen lichaam. Dit laatste is didactisch van groot belang om een intuïtief denkbeeld aan de orde te stellen dat Lorentz (1929) als volgt formuleert:

Op het eerste gezicht schijnt het dat levende wezens een uitzondering vormen op de regel dat een lichaam niet in beweging kan komen zonder dat er een uitwendige oorzaak op werkt; het schijnt dat wij zelf ons lichaam in voortgaande of stijgende beweging kunnen brengen zonder zulk een oorzaak. Bij nadere beschouwing blijkt echter het tegendeel.

In die nadere beschouwing bespreekt Lorentz o.a. de rol van uitwendige krachten bij het beklimmen van een trap, het lopen over een vloer, het voortbomen van een schuit, het zwemmen van vissen en het vliegen van vogels.

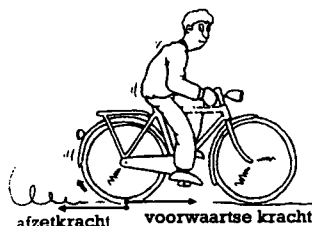


Fig.12. (PLON-vereniging, 1990)

In dezelfde lijn doordenkend zouden we ook modernere voorbeelden kunnen bespreken: de voortstuwing van schepen, vliegtuigen en auto's of fietsen. Hier en daar gebeurt dat ook; zie bv. figuur 12 (PLON-vereniging, 1990).

8. Verschuiving van het gezichtspunt

Hierboven heb ik 'beelden' aangegeven die kunnen dienen om de betekenis en het belang van Newton's derde wet voor leerlingen te verhelderen. Met dat doel zal Hellingman het ongetwijfeld eens zijn, maar hij kiest andere, meer algemene beelden, zoals de voorstelling van een uitgerekt elastiek:

Het is immers onmogelijk om je voor te stellen dat het ene eind, vastgemaakt aan een lichaam, een kracht zou uitoefenen terwijl het andere eind nergens aan vast zou zitten, of geen even grote en tegengesteld gerichte kracht zou uitoefenen.

Helaas, vrees ik, kunnen leerlingen zich maar al te goed voorstellen dat de krachten niet even groot zijn. Als je een karretje voortsleept aan een elastiek, dan 'zie' je toch dat jij via het elastiek harder trekt aan het karretje dan het karretje aan jou? Je overwint immers de tegenwerking⁸. Het lijkt me een goed idee van Hellingman om de aandacht te richten op het elastiek tussen de twee lichamen. De gespannen toestand, zou je kunnen zeggen, manifesteert zich naar beide kanten even sterk (als de massa verwaarloosbaar is en de versnelling 0). Maar dan nog: wat voor krachtwerking via een elastiek geldt, hoeft niet te gelden voor krachtwerkingen die er heel anders uitzien, zoals wrijving of magnetisme.

Het voorbeeld van het elastiek dient mede als inleiding tot een algemene uitspraak over het krachtbegrip:

De interpretatie van een kracht als één zijde van een interactie of wisselwerking, in plaats van een min of meer los staande actie, houdt een belangrijke verschuiving in van het gezichtspunt van waaruit men tegen het krachtbegrip aankijkt. De aandacht wordt verschoven van het lichaam waarop een kracht werkt naar 'ergens tussen' twee lichamen waartussen een wisselwerking plaats vindt. Het idee van kracht als eigenschap van een lichaam is daarmee van de baan.

Het is een passage om verder over na te denken: hoe maak je dit aan leerlingen duidelijk - en helpt het echt? Het is niet ongebruikelijk te spreken over de wrijving 'tussen' een wiel en het wegdek of de aantrekking 'tussen' twee magneten. Dat lijkt wel wat op het spreken over het conflict of de vriendschap 'tussen' twee mensen. Met het woord 'tussen' geven we aan dat de relatie niet los gezien kan worden van *beide* partners en hun beider eigenschappen. Maar dat impliceert nog geen symmetrie: A kan meer houden van B dan B van A, en A zou een grotere aantrekkingskracht kunnen uitoefenen op B dan B op A.

Een historisch belangrijke verschuiving van het gezichtspunt heeft zich voorgedaan in de 19e eeuw, met de introductie en uitwerking van elektrische en magnetische veldbegrippen door Faraday en Maxwell. Aan de krachtwerking 'tussen' bv. twee magneten hebben zij een beeld verbonden van 'krachtlijnen' in de ruimte tussen de magneten. De bijbehorende voorstelling van een aether 'overal tussen' is verdwenen, maar de krachtlijnen, geabstraheerd tot veldlijnen, zijn gebleven. Dat is een verrijking van het krachtbegrip, die in ons onderwijs meer aandacht zou verdienen. Of het 'veldbeeld' de derde wet begrijpelijker maakt is voor mij nog een open vraag. Wel rijzen er bij de toepassing van de wet op bewegende ladingen problemen, die de klassieke mechanica te buiten gaan.

9. Slotopmerkingen

Is het alleen maar conservatisme dat de meesten van ons nog steeds de termen actie en reactie doet gebruiken? Ik vermoed dat er meer achter steekt. De woorden duiden iets aan van het leerproces dat zijn bron heeft in onze lijfelijke ervaring en uitmondt in het natuurkundige krachtbegrip.

In het gewone leven en in het alledaagse taalgebruik is 'kracht' eenzijdig geassocieerd met inspanning, met prestatie, met actie. Ik oefen kracht uit als ik tegen een wand duw (fig.1); de wand biedt alleen maar passief verzet. Newton doorbreekt dit denkschema: hij kent aan de wand ook een soort van actie toe en noemt die reactie. En om geen twijfel te laten bestaan aan de fysische gelijkwaardigheid van de krachten spreekt hij vervolgens van "de werkingen van twee lichamen op elkaar". Zo beschouwd is zijn formulering van de derde wet didactisch helemaal niet zo slecht.

Soms voorzien de termen 'actiekracht' en 'reactiekracht' in een zekere behoefte tot 'inleven' in de situatie. Bijvoorbeeld in de context 'luchtweerstand bij het fietsen': de fietser is doelbewust in actie en 'duwt de lucht weg'; de lucht 'duwt terug'. Fysisch beschouwd zijn fietser en lucht twee lichamen in wisselwerking als gevolg van hun 'toevallige' relatieve beweging - maar die zienswijze is voor leerlingen wel erg abstract. Hetzelfde geldt voor de situatie in figuur 12: de fietser zet zich met zijn fiets af tegen het wegdek en 'daardoor' oefent het wegdek een voorwaartse kracht uit op de fiets. Het woord 'daardoor' beantwoordt aan onze behoefte aan een causaal-verklarend verhaal, ook al is fysisch gezien de ene kracht niet de 'oorzaak' van de andere. Uit deze overwegingen heb ik zelf gekozen, o.a. in het PLON-thema Verkeer (1983), voor het naast elkaar gebruiken van 'wisselwerking' en 'actie-reactie'.

Het kan inderdaad storend zijn dat de woorden actie en reactie buiten onze vaktaal andere betekenissen hebben: een reactie volgt op een actie, werkt soms de actie tegen, soms ook niet ('positieve reactie') enz. De kans op

misverstand wordt al een stuk kleiner als we spreken over *actiekracht* en *reactiekracht*, met duidelijke voorbeelden geïntroduceerd. Dan blijven er nog genoeg problemen, maar die schuilen meer in het hoofdwoord 'kracht' dan in de voorvoegsels.

Anders dan Hellingman pleit ik niet voor het uitbannen van de termen actie en reactie in iedere vorm en in iedere context. Wel zou ik het gebruik willen binden aan drie voorwaarden:

- geen verkorting tot de kreet "actie is min reactie";
- alleen in combinatie met kracht: actiekracht en reactiekracht;
- alleen in contexten waar de term 'actie' voor de hand ligt, bv. omdat een mens of machine 'in actie' is;
- alleen in combinatie met de termen wisselwerking en/of interactie.

Noten:

1. Een minder treffend voorbeeld is het duistere artikel van Aspden, dat Hellingman aanleiding geeft tot de curieuze vraag "hoeveel fysici/technici bezig zijn de geldigheid van de derde wet te onderzoeken, gebaseerd op onbegrip ervan". Nogal overtrokken is ook de opmerking over de "vijftien hoog gekwalificeerde personen, waaronder vijf professoren" die verzuimd hebben Krans en Vrij op een fout in hun boek te wijzen.
2. Beth, naar wie Hellingman verwijst, gebruikt in zijn vertaling niet de woorden actie en reactie, maar werking en terugwerking.
3. Het woord 'denkbeeld' is een geschenk van de Nederlandse taal: het duidt mooi de vervlechting aan tussen verbale en non-verbale componenten in ons denken.
4. I made the experiment on the loadstone and iron. If these, placed apart in proper vessels, are made to float by one another in standing water, neither of them will propel the other; but, by being equally attracted, they will sustain each other's pressure, and rest at last in an equilibrium.
5. Ik neem aan dat Krans en Vrij zoiets bedoelden in de door Hellingman bekritiseerde passage over een persoon in een roeiboot die probeert de boot vooruit te duwen. Kinderen denken soms, meerijsend op een fiets of meevarend in een boot, dat ze kunnen helpen door te duwen.
6. Ook in de geschiedenis van de natuurkunde is dit proces moeizaam verlopen. Newton's tijdgenoot en rivaal Leibniz kende aan een bewegend lichaam een 'levende kracht' toe, op een factor $\frac{1}{2}$ na identiek met het latere begrip kinetische energie. Pas omstreeks 1850 werden de verschillende 'kracht'begrippen duidelijk van elkaar onderscheiden. En tot omstreeks 1950 was de term levende kracht nog in sommige schoolboeken te vinden.
7. Ik gebruik hier de door Hellingman gewraakte uitdrukking "de kracht van A op B" om aan te geven dat juist bij een context als aarde-maan eventuele misverstanden opgehelderd kunnen worden. Zouden er echt "grote aantallen studenten blijven" die denken dat de kracht die op de maan wordt uitgeoefend "in een andere setting even goed op een ander lichaam uitgeoefend zou kunnen worden"? Zien ze geen onderscheid tussen "de kracht van de aarde op een rotsblok" en "de kracht van de aarde op een zandkorrel"?
8. In mijn eerder geciteerde onderzoek kwam een vraag voor over een auto die een caravan trekt. 38% van de leerlingen in 4vwo was het niet eens met de bewering "de kracht waarmee de caravan aan de auto trekt is even groot als de trekkracht van de auto op de caravan".

9. Literatuur

- Biezeveld, H. & L.Mathot (1990). *Scoop, 4/5 vwo, 3e druk*. Groningen: Wolters-Noordhoff.
- Cajori, F. (1966). *Sir Isaac Newton's Mathematical Principles*. Berkeley: University of California Press.
- Dijksterhuis, E.J. (1950). *De mechanisering van het wereldbeeld*. Amsterdam: Meulenhoff.
- Genderen, D. van (1983). Kracht en tegenkracht, actie en reactie: een onderzoek naar denkbeelden van leerlingen, *Tijdschrift voor Didactiek der β -wetenschappen*, 1, 48-61.
- Genderen, D. van (1989). *Mechanica - onderwijs in beweging*. Utrecht: WCC.
- Hellingman, C. (1992). Newton's derde wet opnieuw bezien, *Tijdschrift voor Didactiek der β -wetenschappen*, 10, 101-111.
- Hogenbirk, P. G. e.a. (1991). *Natuurkunde Overal, 4V*. Culemborg: Educaboek.
- Jardine, J. (1966). *Physics is fun, book 3*. Nederlandse vertaling en bewerking onder de titel *Natuurkunde...Doen, 3HV*. Kampen: Kok.
- Langras, R. e.a. (1990). *Natuurkunde voor nu en straks, 3M-cd*. Zutphen: Thieme.
- Lorentz, H.A. (1929). *Beginselen der natuurkunde, deel 1, 9e druk*. Leiden: Brill.
- Middelink, J.W. (1978). *Systematische natuurkunde A, 2e druk*. Apeldoorn: Van Walraven.
- Middelink, J.W. (1990). *Systematische natuurkunde A, 3e druk*. Apeldoorn: Van Walraven.
- PLON (1983). *Thema Verkeer*. Utrecht: Vakgroep Natuurkunde-Didactiek RUU.
- PLON-vereniging (1990). *Interactie: fysica in thema's, 4V*. Zeist: NIB.
- Schweers, J. & P. van Vianen (1957). *Natuurkunde op corpusculaire grondslag, deel III*. 's Hertogenbosch: Malmberg.
- Schweers, J. & P. van Vianen (1971). *Natuurkunde op corpusculaire grondslag, 3V*. 's Hertogenbosch: Malmberg.
- Viennot, L. (1979). Spontaneous reasoning in elementary dynamics, *European Journal of Science Education*, 1, 205-221.