

Authentieke drijfveren in de ontwikkelingsgeschiedenis van de natuurkunde: de betekenis voor onderwijs anno 1984

J.M.Beltman

Afdeling Didactiek Natuurkunde, K.U.-Nijmegen

Samenvatting

De wetten, vaardigheden, etc. uit de eindexamenprogramma's natuurkunde zijn producten van een historisch proces. Een proces waarbij mensen op zoek gingen naar antwoorden op vragen die hen fascineerden. De idee wordt geopperd fysica te onderwijzen via een soortgelijk proces; authentieke vragen van leerlingen zijn daarbij de inzet, beheersing van een stukje fysica uit het schoolprogramma 'n resultaat.

Dit idee wordt uitgewerkt voor het dynamica onderwijs. Een verkenning van de historie voert tot de vaststelling dat verwondering over het auto-mobile zijn van los door de ruimte (lucht) bewegende objecten de authentieke bron vormt waaruit Newtons dynamica is voortgekomen.

Eenzelfde soort verwondering lijkt in de kiem aanwezig bij vele twintigste eeuwers, als het gaat om man-made en levendé auto-mobilen.

Kunnen authentieke vragen van leerlingen m.b.t. zulke auto-mobilen tot inzet gemaakt worden van dynamica onderwijs ?

Via een ruwe schets voor dergelijk onderwijs wordt een voorlopig antwoord gegeven.

1. Inleiding

Zo ik ooit al aan de toekomst dacht, dan droomde ik ervan eens een school te stichten waar jonge mensen konden leren zonder zich te vervelen, waar ze gestimuleerd werden problemen te opperen en te bediscussiëren. Een school waar men niet hoefde te luisteren naar antwoorden op vragen die men nooit gesteld had, waar men niet studeerde om examens te halen.

Karl Popper

De fysica heeft vele gezichten. Eén ervan is pragmatisch, 'n ander authentiek. Het pragmatische gezicht heeft het aanzien van een essentiële factor in het productieproces binnen onze samenleving. Het authentieke gezicht ziet er heel anders uit. Het toont een ontwikkelingsproces waarbij opeenvolgende generaties mensen zoeken naar antwoorden op authentieke, cosmologische vragen.

In het natuurkunde onderwijs domineert het pragmatische beeld van de fysica. De technieken (meten, rekenen, etc.) die de fysicus gebruikt zijn verheven tot belangrijkste leerdoel. Deze dominantie van het pragmatische gezicht is niet verwonderlijk; het stemt overeen met de dominante visie binnen onze samenleving op de natuurwetenschappen als productiefactor. Daarentegen komt het authentieke gezicht van de fysica weinig aan bod in onze scholen. De antwoorden die binnen de fysica in de loop der tijden zijn geproduceerd op authentieke vragen van mensen over de wereld, komen nauwelijks als zodanig aan de orde

Ik ga ervan uit dat het authentieke gezicht van de fysica meer op z'n plaats is in de school dan het pragmatische. Preciezer geformuleerd, dat het passender is om i.p.v. de technieken van de fysica, authentieke vragen van leerlingen tot inzet te maken van het natuurkunde onderwijs.

Op het eerste gezicht lijkt zo'n verschuiving zich niet te verdragen met de randvoorwaarden die gesteld zijn aan het huidige natuurkunde onderwijs, met name niet met de eindexamen eisen. Toch is er een reden de idee om authentieke vragen van leerlingen tot inzet te maken van het natuurkunde onderwijs niet direct naar de prullenmand te verwijzen. Immers, ook het geheel van wetten, vaardigheden, etc. uit de schoolprogramma's is het product van een proces waarbij mensen op zoek gingen naar antwoorden op vragen die hen fascineerden. Dit suggereert een weg waarlangs de natuurkunde uit de schoolprogramma's te onderwijzen is, via het bedrijven van fysica op authentieke wijze:

- Bestudeer de ontwikkelingsgeschiedenis van de natuurkunde.
- Onderzoek met name de authentieke drijfveren die mensen ertoe aanzetten om bepaalde vragen te formuleren en op zoek te gaan naar antwoorden.
- Onderzoek of met behulp van soortgelijke drijfveren leerlingen anno 1984 te stimuleren zijn om problemen te opperen, op te lossen en zodoende de natuurkunde uit de schoolprogramma's te leren.

Te hooi en te gras hebben medewerkers en studenten aan de lerarenopleiding natuurkunde van de K.U.N. aan bovenstaand programma gewerkt. De resultaten hebben ons geleerd dat de ontwikkelingsgeschiedenis van de natuurkunde een goudmijn vormt van authentieke drijfveren die te benutten zijn ten behoeve van onderwijs waarvan Popper droomde (zie citaat).

De bedoeling van dit artikel is een indruk te geven van ons werk aan bovenstaand programma, voor zover het dynamica onderwijs betreft. Op de volgende bladzijden wordt niet een uitgewerkte en aan de schoolpraktijk getoetste opzet voor dynamica onderwijs aangeboden. Dat is onmogelijk omdat ons werk nog verkeert in de laboratoriumfase; het didactische laboratorium wel te verstaan. Het gaat hier om een tussentijds bericht uit dat laboratorium.

2. Een paar vragen betreffende dynamica onderwijs

Isaac Newton (1642-1727) formuleert in zijn PHILOSOPHIAE NATURALIS PRINCIPIA MATHEMATICA (1687) drie fundamentele LEGES MOTUS (bewegingswetten). Ze luiden als volgt (1):

Wet I.

Ieder lichaam volhardt in den toestand van rust of rechtlijnige eenparige beweging, behalve voor zoover het door de inwerking van krachten gedwongen wordt, dien toestand te wijzigen.

Wet II.

De verandering van den impuls is evenredig met de werkende kracht, en geschiedt langs de lijn, volgens welke de kracht werkt.

Wet III

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.

Nu, bijna 300 jaar later, zijn deze wetten onderdeel van het natuurkunde eind-examenprogramma voor HAVO en VWO.

Er zullen niet zoveel 15-jarigen zijn die deze leges motus ervaren als antwoorden op vragen die hen intrigeren. Deze leges motus hebben op het eerste gezicht weinig boeiends te melden omtrent de wereld waarin ze leven.

Niettemin zijn de drie bewegingswetten voortgekomen uit het nadenken van mensen over problemen die hen uitermate boeiden. Daarbij ging het niet om enkele mensen uit een bepaalde tijd en cultuur, die toevallig geïnteresseerd waren in een bepaald probleem. Het ging hierbij om een 2000-jarig evolutieproces waarin een hele stoet van onderzoekers uit verschillende tijden en culturen bezig is geweest met eenzelfde complex van problemen.

Wat voor complex van problemen was dat ? Wat bezielde mensen om na te denken over die problemen ? Wat waren de drijfveren achter hun arbeid ? Zijn deze drijfveren anno 1984 nog werkzaam ? Zijn ze te benutten om bij de drie bewegingswetten het soort onderwijs te realiseren waarvan Popper droomde ?

In de volgende paragrafen wordt gepoogd antwoorden te geven op deze vragen.

3. Verwondering over auto-mobilen: de authentieke bron waaruit Newtons dynamica is voortgekomen

De oorspronkelijke motor achter het 2000-jarige evolutieproces dat de drie bewegingswetten van Newton voortbracht, is een vraag geweest die vele mensengemeenschappen heeft beziggehouden: Wie of wat bestuurt/veroorzaakt/bewerkt de veranderingen in de wereld ?

Mensen, grootgebracht met een gemechaniseerd wereldbeeld (in de zin van Dijksterhuis, 1950), zullen niet licht deze vraag spontaan stellen, laat staan zich er druk over maken. Toch is het mogelijk om iets van de oorspronkelijke fascinatie van het probleem van de verandering na te voelen.

Stel, u betreedt een huiskamer en ziet het volgende gebeuren. Een stoel in één van de hoeken beweegt 20 cm omhoog. Vervolgens beweegt de stoel op een hoogte van 20 cm naar de tegenoverliggende kamerhoek. Daar aangekomen beweegt de stoel 20 cm omlaag en komt tot stilstand op de vloer. Deze gebeurtenis zal u niet verwonderen indien u een mens kunt ontwaren die de stoel beweegt; direct of indirect via een mens-gestuurd mechanisme. Indien zo'n mens niet te ontdekken is, blijft u verbijsterd achter met de vraag wie of wat de stoel beweegt.

In de wereld, ons aller huiskamer, vinden velerlei veranderingen plaats zonder dat mensen daar de hand in hebben. Hemellichamen veranderen van plaats, planten groeien, bladeren verkleuren. Net als de bewegende stoel, hebben deze veranderingen het vermogen te verbijsteren. Immers, een intrigerende vraag kan opkomen. Als het niet een mens is, wie of wat veroorzaakt/bewerkt/bestuurt dan dergelijke veranderingen ?

Beweging is één van de vele soorten verandering; verandering van plaats. De vraag: wie of wat bestuurt/veroorzaakt/bewerkt beweging (op- en ondergaan van zon, maan en sterren; opstijgen van rook, vallen van steen; etc.), is de primaire motor geweest achter het 2000-jarige evolutieproces waaruit de bewegingswetten van Newton zijn voortgekomen.

Is deze motor in staat om een 15-jarige uit 1984 te bewegen tot het opperen en bediscussiëren van problemen op zo'n wijze dat uiteindelijk de bewegingswetten

van Newton als antwoorden tevoorschijn komen? Om deze vraag te beantwoorden is het goed het evolutieproces wat nader te bekijken.

De gedachten die Aristoteles (384-322 v. Chr.) zich maakte over wie of wat verandering van plaats veroorzaakt/bewerkt/bestuurdt, staan aan het begin van het evolutieproces. Zijn gedachten komen hier op neer (Dijksterhuis, 1950):

Aristoteles gaat ervan uit dat iedere beweging (*motus*) een beweger (*motor*) vereist: *omne quod movetur ab alio movetur* (alles wat in beweging verkeert wordt door iets anders bewogen). En wel moet die *motor* hetzij in het *mobile* (zich bewegend lichaam) huizen, hetzij daarmee in onmiddellijk contact staan; *actio in distans* (werking op afstand) wordt als ondenkbaar uitgesloten; een *motor* moet steeds een *motor conjunctus* (met het mobile verbonden) zijn.

Eén van de kernkwesties bij Aristoteles is het opsporen van de motor. Bij levende wezens is dat niet moeilijk: de *anima* (ziel), die het levensbeginsel is, is tevens het bewegingsprincipe; de levende wezens bewegen zich *a se*, uit eigen kracht. Voor de *corpora inanimata* (levenloze lichamen) is de kwestie echter niet altijd zo eenvoudig op te lossen.

Bij los door de lucht bewegende levenloze lichamen (vallende steen; opstijgende rook; omhoog geworpen steen; in willekeurige richting voortgeschoten pijl) is het voor Aristoteles niet eenvoudig om de *motor conjunctus* aan te wijzen. Immers, bij een los door de lucht bewegend levenloos lichaam is er niets dat zich spontaan aan onze geest opdringt als de met het object verbonden (van binnen of van buiten) motor. Daarnaast dringen zich bij deze categorie bewegingen nog andere, niet eenvoudig op te lossen kwesties op. Voorbeeld: waarom bewerkt de *motor conjunctus* dat levenloze lichamen al vallende hun beweging versnellen?

Aristoteles beschouwt ook levenloze lichamen die worden voortgeduwd of voortgetrokken: een wagen op een weg, een schip in water. Hier bestaat natuurlijk geen probleem inzake de *motor conjunctus*; men ziet hem werken. Aristoteles heeft aan gaande deze bewegingen enkele zeer expliciete stellingen geformuleerd, die de Aristotelische tegenhanger vormen van de tweede bewegingswet van Newton ($F=m \cdot a$). Dijksterhuis drukt deze stellingen als volgt uit in hedendaagse wiskunde taal:

$$v = f \cdot \frac{K}{W}$$

v : snelheid van het voortgetrokken of voorgeduwde object

K : maat voor de kracht waarmee geduwd of getrokken wordt

W : maat voor het geheel van invloeden die de beweging bemoeilijken, waarbij Aristoteles denkt aan de logheid van het object en de weerstand die het medium biedt waarover of waarin het object beweegt.

f : evenredigheidsconstante

De bewegingen van levenloze lichamen die Aristoteles beschouwt, zijn te verdelen in twee klassen:

Klasse A: Los door de lucht bewegende levenloze lichamen (vallende steen; omhoog geworpen steen; etc.). Hierbij is het aanwijzen van de MOTOR CONJUNCTUS een probleem.

Klasse B: Voortgeduwde of voortgetrokken levenloze lichamen (kar; schip; etc.).

Hierbij is het aanwijzen van de MOTOR CONJUNCTUS geen probleem.

Het zijn vooral de bewegingen uit klasse A, dus val en worp, geweest die de gemoeidere 2000 jaar lang hebben beziggehouden. De dynamica van Newton is voornamelijk voortgekomen uit dit nadenken over val en worp (Dijksterhuis, 1924). Dat juist val en worp de aandacht trokken is niet zo verwonderlijk:

- Deze bewegingen roepen de moeilijkst te beantwoorden vragen op (wie of wat is de motor conjunctus bij een los door de lucht bewegend levenloos lichaam; waarom bewerkt de motor conjunctus dat levenloze lichamen al vallende hun beweging versnellen; etc.)
- Een los door de ruimte (lucht) bewegend levenloos lichaam fascineert doordat het een auto-mobile is. D.w.z. dat het, werkelijk of schijnbaar, door de wereld beweegt, zonder bewogen te worden, dus uit zichzelf.

Dat het zo moeilijk was om via de weg van val en worp de fundamentele bewegingswetten te onderkennen, is achteraf begrijpelijk. Immers, deze weg voert over een moeilijk te nemen hindernis: de gravitatie als motor van onveranderlijke sterkte welke werkt op afstand; nml. vanuit de aarde.

4. Dynamica onderwijs als zoektocht naar de oorzaak van het voortbewegeeffect bij man-made auto-mobile.

De voornaamste drijfveer achter de evolutie die leidde tot de bewegingswetten van Newton was

de verwondering opgeroepen door het auto-mobile zijn van los door de lucht bewegende voorwerpen (vallende of weggeworpen voorwerpen).

Is deze authentieke verwondering anno 1984 nog aanwezig? 'Nee' lijkt het meest reële antwoord. Immers, weinig mensen zullen nu nog gefascineerd worden door een los door de lucht vliegende steen. Wel is er bij twintigste eeuwers een

fascinatie aan te wijzen die in wezen gelijk is aan die welke uitgaat van het auto-mobile zijn van een omhoog geworpen steen. Dat is de fascinatie opgeroepen door man-made auto-mobilen; mobilen die een door mensen gemaakte voortbeweeginrichting bij zich dragen en daardoor uit zichzelf kunnen voortbewegen: land-, water-, lucht- en ruimtevoertuigen.

Eenzelfde soort fascinatie is aanwezig waar het gaat om levende auto-mobilen: vliegende vogels, zwemmende vissen, manoeuvrerende micro-organismen. Immers, in een gemechaniseerd werelddeel wordt een levend auto-mobile niet als essentieel anders ervaren als een man-made auto-mobile.

De idee dringt zich nu op om authentieke vragen van leerlingen m.b.t. man-made en levende auto-mobilen tot inzet te maken van dynamica onderwijs. Om te kunnen beoordelen of dat mogelijk is, moeten vijf vragen worden beantwoord:

- Zijn bij 15-jarigen authentieke vragen op te roepen m.b.t. auto-mobilen ?
- Wat voor vragen zijn dat ?
- Hoe kan in de klas onderzoek verlopen n.a.v. zulke vragen ?
- Welke onderzoeksresultaten kunnen tevoorschijn komen ? Kunnen ze door 15-jarigen worden gewaardeerd als nieuw verworven inzichten omtrent de wereld waarin ze leven ?
- Vallen de onderzoeksresultaten samen met de drie bewegingswetten van Newton ?

In deze en de volgende paragraaf wordt gepoogd voorgaande vragen te beantwoorden.

Als het waar is dat veel mensen gefascineerd kunnen worden door man-made en levende auto-mobilen, dan moet het mogelijk zijn om bij leerlingen een authentieke interesse op te roepen voor de grote verscheidenheid aan auto-mobilen in micro, meso en macro cosmos. De in overvloed beschikbare prachtige registraties (film, video) van in water manoeuvrerende micro-organismen, vrij door de lucht scherende vogels, schijnbaar moeiteloos door het water glijdende en wendende vissen, voortijlende hovercrafts, varende luchtschepen, ruimtevoertuigen, etc. kunnen daarbij goede diensten bewijzen. M.b.v. dergelijk materiaal kan een docent een bepaald beeld oproepen van de cosmos waarin we leven: een 3-dimensionaal, oneindig uitgestrekt toneel, bevolkt met mobilen die worden bewogen of zichzelf bewegen. Aldus kan de reeds aanwezige, meer of minder diepgaande interessen bij leerlingen voor enkele specifieke auto-mobilen uitgroeien tot een belangstelling voor de cosmos als toneel van een grote verscheidenheid van voortbewegende mobilen.

Als het gaat om micro, meso en macro auto-mobilen is er één allesomvattende vraag. Dat is de vraag die ook de drijfveer was achter de 2000-jarige evolutie

van de dynamica: de vraag naar de motor. Motor opgevat in de Aristotelische zin: dat wat de voortbeweging veroorzaakt.

Hoewel leerlingen geboeid kunnen zijn door de grote verscheidenheid aan auto-mobilen in de cosmos, is het niet vanzelfsprekend dat daarmee tevens een belangstelling gepaard gaat voor het vraagstuk van de uiteindelijke oorzaak van het voortbewegeeffect. Wat telt in dit verband, is of deze belangstelling in potentie aanwezig is; of er een kiem is waaruit die belangstelling tot ontwikkeling gebracht kan worden. Ik ga ervan uit dat bij vele leerlingen zulk een kiem aanwezig is en dat ze tot ontwikkeling kan worden gebracht in een onderzoek dat de docent initieert doch gaandeweg steeds meer het onderzoek van leerlingen wordt.

Hoe kan, in de klas, onderzoek aan de motor (opgevat als oorzaak van het voortbewegeeffect) bij auto-mobilen verlopen? Voor de hand ligt om het onderzoek te richten op een kleine, representatieve selectie uit de grote verscheidenheid van voortbeweeginrichtingen. Voor onderzoek in de klas biedt de volgende selectie vele mogelijkheden (zie fig. 1):

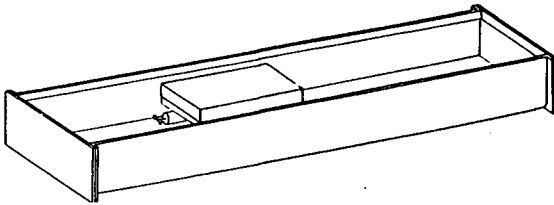


Fig. 1a

Model vaartuij met water-propeller-voortbeweeginrichting.

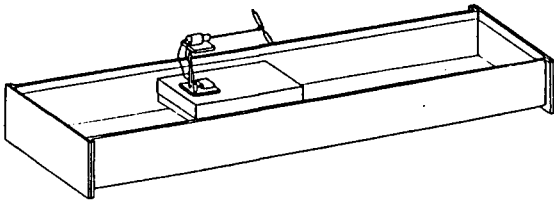


Fig. 1b

Model vaartuij met lucht-propeller-voortbeweeginrichting.

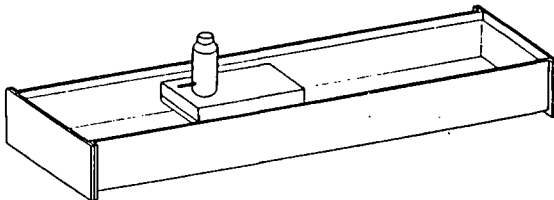


Fig. 1c

Model vaartuij met waterstraal-voortbeweeginrichting.

- Als mobilien:
Model watervaartuigen (bijvoorbeeld massieve schepen in diverse vormen en afmetingen van hout en van tempex) in een model rivier (watertrog van ± 2 meter lengte).
- Als voortbeweeginrichtingen waarmee de vaartuigen worden uitgerust:
 - . waterpropeller (electricisch aangedreven)
 - . luchtpropeller zoals bij hovercraft (electricisch aangedreven)
 - . waterstraalmotor (met water gevuld blikje waaruit door een gaatje water stroomt).

Juist watervaartuigen zijn geschikt voor onderzoek in de klas om de volgende redenen:

- Bijna alle denkbare voortbeweeginrichtingen, hoe zwak ook, veroorzaken voortbeweging indien geplaatst op een (tempex) model watervaartuig.
- Problemen met het waterpas maken van de vaarweg zijn afwezig.
- Bewegingsanalyses zijn uitvoerbaar m.b.v. een handbediende stopwatch doordat langzame vaarten mogelijk (en reproduceerbaar) zijn.

Hoe kan onderzoek verlopen naar de oorzaak van het voortbewegeeffect bij de genoemde selectie van voortbeweeginrichtingen? Een activiteit waarbij denkbeelden van leerlingen omtrent deze oorzaken worden geïnventariseerd en gepreciseerd, is 'n mogelijke start. Uit zo'n activiteit kan bijvoorbeeld de volgende precisering van het bekende afduwdenkbeeld voortkomen:

- Genoemde voortbeweeginrichtingen zetten materie in beweging.
 - Een draaiende luchtpropeller blaast lucht achterwaarts.
 - Een draaiende waterpropeller stuwt water achterwaarts.
 - Een werkende waterstraalmotor stuwt water achterwaarts.
- De in beweging gezette materie duwt tegen stilstaande materie.
 - Bij een luchtpropeller: de achterwaarts geblazen lucht duwt tegen stilstaande lucht.
 - Bij een waterpropeller: het achterwaarts gestuwde water duwt tegen stilstaand water.
 - Bij een waterstraalmotor: het achterwaarts uitstromende water duwt tegen het rivierwater wanneer het daarmee in contact komt na een korte reis door de lucht.
- De stromende materie die duwt tegen stilstaande materie wordt geassocieerd met een stok die een schipper duwt tegen een muur.
Voortbeweging is het gevolg van het duwen van de stromende materie tegen de stilstaande materie; net als bij schipper en stok. Er is dus sprake van afduwen.

Het bijzondere is dat bij genoemde voortbeweeginrichtingen de 'stok' evenals de 'muur' van water of lucht is. Dit is een problematisch punt. Immers, een stok van water of lucht bezit geen stevigheid, terwijl een muur van water of lucht wijkt onder duwen.

Een eerste onderzoeksrunde naar de oorzaak van het voortbewegeeffect zou kunnen bestaan uit het bedenken en uitvoeren van experimenten ter toetsing van de gepreciseerde denkbeelden voortgekomen uit bovengenoemde startactiviteit.

Enkele voorbeelden van zulke experimenten om de stoktheorie te toetsen:

- Wat een luchtpropeller precies doet met lucht is na te gaan m.b.v. rook. De lucht vlak voor de propeller blijkt toe te stromen naar het draaivlak (het idee 'aanzuigen' komt op). Achter de propeller is een 'buis' van tamelijk grote lengte waarin de lucht met aanzienlijke snelheid voortstroomt.
- Een luchtpropeller blaast dus inderdaad lucht naar achteren, maar over een veel grotere lengte als velen denken. De stokfunctie van de stromende lucht komt daarmee in het geding.
- Een stoktheorie aanhanger veronderstelt dat een water- of luchtstok enige stevigheid bezit, zodat afduwen m.b.v. zo'n stok mogelijk is. Nu is een kortere stok steviger als een langere. Daarom denkt een stoktheorie aanhanger dat een waterstraal-voortbeweeginrichting beter werkt als de straal wordt ingekort, dus wanneer de 'muur' waartegen de straal duwt dichter bij de uitstroomopening wordt geplaatst. Het volgende experiment (zie fig.2) levert voor een stoktheorie aanhanger een verbijsterend resultaat op. Het plaatsen van een 'muur' (b.v. hand) bij A heeft niet de minste invloed op de stand van de waterstraalmotor en bijgevolg op zijn sterkte.

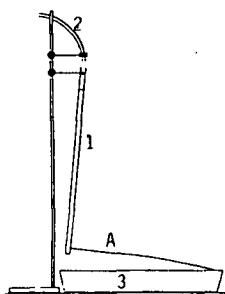


Fig.2

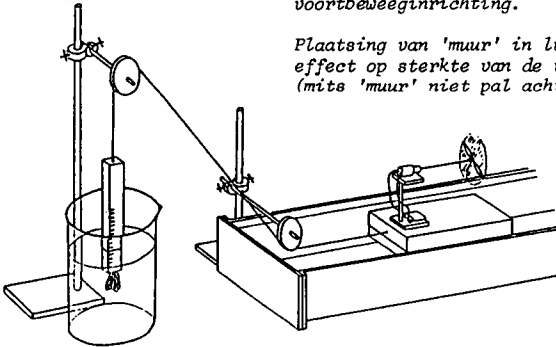
Opstelling voor experimenten aan waterstraalmotor.

1. waterstraalmotor
(draaibaar opgehangen PVC-buis met uitstroomopening)
2. watertoevoerslang
3. wateropvangbak

- Een stoktheorie aanhanger veronderstelt dat een 'muur' van water of lucht wijkt bij duwen. Daarom denkt een stoktheorie aanhanger dat een luchtpropeller-voortbeweeginrichting beter werkt als achter de draaiende propeller een stevige muur staat i.p.v. een luchtmuur. Ook dit effect blijkt niet te bestaan. Zie fig. 3 voor de opstelling.

Fig.3 Opstelling voor experimenten aan luchtpropeller-voortbeweeginrichting.

Plaatsing van 'muur' in luchtstraal heeft geen effect op sterkte van de voortbeweeginrichting (mits 'muur' niet pal achter propeller staat).



Toetsingsexperimenten zoals boven omschreven leiden tot de conclusie dat de stoktheorie en aanverwante theorieën niet deugen. Hoe komt het voortbewegeeffect dan wél tot stand? Deze vraag kan aanzetten tot een tweede onderzoekronde. Zo'n tweede ronde kan van dien aard zijn dat de volgende inzichten tevoorschijn komen (beschrijvingen van mogelijke experimenten laat ik achterwege):

- Het voortbewegeeffect is enkel en alleen het gevolg van duwen van de voortbeweeginrichting zélf tegen materie. Een voortbeweeginrichting duwt zichzelf af tegen materie.
- De materie waartegen geduwd wordt, kan materie uit de omgeving zijn of materie afkomstig uit het auto-mobile zelf.
- Ook als de materie waartegen geduwd wordt zelf mobiel is, treedt een afduweffect op.
- Dit ligt niet primair daaraan dat de mobiele materie gehinderd wordt in haar beweging door de omgeving; m.a.w. min of meer vast zit aan de omgeving. Zelfs als alle banden tussen de weggeduwde materie en de rest van de wereld zijn verbroken, treedt toch nog het afduweffect op.
- Dus mobiele materie, welke los is van alle andere materie in de wereld, biedt toch verzet tegen wegduwen waardoor afduwen tegen zulke materie mogelijk is.

De oorzaak van dit verzet moet gelegen zijn in de mobiele materie zelf. Namen voor deze eigenschap van materie: logheid, traagheid, inertie.

Laatstgenoemd inzicht bergt de aanzet in zich voor een derde onderzoeksronde. Immers, de volgende kwestie ligt voor de hand. Als de voortbeweeginrichting van auto-mobile 1 duwt tegen mobile 2, dan komen beide mobilen in beweging. Mobile 2 doordat het wordt weggeduwd. Mobile 1 doordat mobile 2 verzet biedt, zodat een afduweffect optreedt. Krijgen beide mobilen evenveel snelheid? Of is er sprake van een andere verhouding van de snelheden? Wordt die verhouding bepaald door de wijze waarop 1 duwt tegen 2?

Deze derde onderzoeksronde levert een wonderlijk resultaat op (beschrijvingen van experimenten laat ik achterwege):

Ongeacht de wijze van duwen, wordt steeds één en dezelfde verhouding gevonden tussen de snelheden v_1 en v_2 van de mobilen 1 en 2 tijdens en na afloop van het duwproces. Het wonderlijke is dat berekening van v_1/v_2 steeds hetzelfde getal oplevert, ongeacht of het duwen krachtig, zwak, langzaam of snel gebeurde. Zelfs maakt het niet uit welke van de twee mobilen duwde en welke geduwd werd. Het verhoudingsgetal v_1/v_2 is slechts afhankelijk van het duo mobilen dat bekeken wordt.

De ontdekte wetmatigheid biedt de mogelijkheid om een maat in te voeren voor de logheid of traagheid van een mobile. Voor de hand ligt om van een twaantal mobilen dat mobile de grootste logheid/traagheid toe te kennen, dat na een afduwproces tussen beide mobilen het minst in beweging is geraakt (de kleinste snelheid heeft). Een maat voor de logheid/traagheid van een mobile kan als volgt worden vastgelegd:

Een mobile is n x zo log/traag als een standaard mobile, als na afloop van een wegduwproces tussen beide mobilen zijn snelheid n x zo klein is als dat van het standaard mobile.

De bovengenoemde wetmatigheid blijkt dan als volgt te formuleren te zijn:

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{m_2}{m_1}$$

waarbij m_1 en m_2 de logheden/traagheden zijn van de mobilen 1 en 2 t.o.v. een standaard mobile.

Na generaliseren van de resultaten uit de derde onderzoeksronde, kan de balans worden opgemaakt van het onderzoek aan de motor (oorzaak van het voortbewegeeffect) bij auto-mobilen. Ongeacht het precieze verloop van het onderzoek, zal zo'n balans niet veel afwijken van de volgende:

- Een auto-mobile manoeuvreert zich door de wereld door zich af te duwen tegen of zich toe te trekken naar een object (werking over afstand is hierbij niet uitgesloten).

Zo'n object is zelf beweegbaar daar geen enkel object vast zit in de cosmos; elk object is een mobile.

Interactie tussen mobilen is dus het fundamentele proces in de cosmos als het gaat om beweging.

- Twee mobilen in interactie ondergaan beide een snelheidsverandering. Hoe de respectievelijke veranderingen zich verhouden wordt uitsluitend en alleen bepaald door de zgn. logheid of traagheid (m) van de mobilen. Het logste/traagste mobile ondergaat de kleinste snelheidsverandering; het minst logge/trage mobile de grootste.

$$\text{Precies: } m_1 \Delta \bar{v}_1 = -m_2 \Delta \bar{v}_2$$

- Zolang een mobile niet in interactie is met enig ander mobile, verandert zijn snelheid niet.

Deze universele interactieregels zijn qua experimenteel verifieerbare inhoud volledig equivalent met de drie bewegingswetten van Newton. De brug tussen deze interactieregels en de drie wetten is te slaan door de introductie van de grootheden 'hoeveelheid van beweging' (impuls) en 'sterkte van de interactie' (kracht): impuls van een mobile: $m\bar{v}$ (hoeveelheid van beweging)

kracht werkend op mobile: $\frac{\Delta m\bar{v}}{\Delta t}$ (tempo waarmee hoeveelheid van beweging verandert t.g.v. interactie; maat voor sterkte van de interactie op een tijdstip)

De introductie van deze twee grootheden voegt niets nieuws toe aan de experimenteel verifieerbare inhoud van de onderzoeksresultaten. Wel maken ze het mogelijk om dezelfde inhoud in een andere vorm te gieten: de drie bewegingswetten van Newton (2).

5. Conclusies en kanttekeningen

Uit de paragrafen 3 en 4 wil ik de volgende, voorlopige conclusie trekken:

- Er bestaat een authentieke, cosmologische vraag die tot inzet gemaakt kan worden van dynamica onderwijs. Het is de klassieke vraag naar de 'motor' (opgevat als oorzaak van het voortbeweegeffect) bij allerlei auto-mobilen in de cosmos: land-, water- en luchtdieren; land-, water-, lucht- en ruimtevoertuigen; hemellichamen.

Dynamica ónderwijs is in te richten als een zoektocht naar het antwoord op de

vraag waardoor auto-mobilen zich kunnen voortbewegen zonder (werkelijk of schijnbaar) te worden voortbewogen.

- De vraag naar de 'motor' is een rationalisatie van authentieke fascinatie door het fenomeen 'voortbewegen uit zichzelf', welke bij veel mensen in de kiem aanwezig is. Daardoor kan de vraag naar de 'motor' een vraag van leerlingen worden. Is ze dat eenmaal, dan geeft de vraag naar de 'motor' voortdurend zin en richting aan het onderwijsleerproces. De gehele onderneming krijgt voor leerlingen een herkenbare inzet en opzet.

Uiteraard kan alleen uit de schoolpraktijk blijken of deze conclusie juist is. Om een toetsing aan de praktijk mogelijk te maken, moet een aantal zaken nader worden uitgewerkt.

Ik som ze hier op:

- T.b.v. de drie onderzoeksrondes naar de uiteindelijke oorzaak van het voortbewegeffect (zie par. 4), moet een collectie experimenten worden ontwikkeld waaruit de docent een keuze kan maken die passend is bij de gedachtengang welke zich in de klas kan ontwikkelen. Een onderzoek naar denkbeelden van leerlingen betreffende oorzaken van het voortbewegeffect, kan hierbij goede diensten bewijzen.
- De didactiek van de overgang 'universele interactieregel + wetten van Newton' via de introductie van het krachtconcept als interactiesterkte, moet nader uitgewerkt worden. Het artikel MOMENTUM FIRST: AN ALTERNATIVE APPROACH TO NEWTONIAN DYNAMICS van Ogborn (1965) kan hierbij goede diensten bewijzen. Van belang in dit verband is zijn eindconclusie dat het onderwijzen van Newtons dynamica via de universele interactieregel voordelen biedt t.o.v. een rechtstreekse 'kracht-versnelling' aanpak.
- De universele interactieregel is psychologisch gezien een teleurstellend resultaat van een zoektocht naar de uiteindelijke oorzaak van het voortbewegeffect. Immers, deze regel zegt alleen iets over het resultaat van interactie; niets over interactieprocessen zelf. Hoewel diverse typen interacties (gravitatie interactie, elektrische interactie; etc.) nader beschreven kunnen worden in termen van hun sterkte ($\frac{dmv}{dt}$), blijven de interactieprocessen zelf een mysterie. Dit is een kenmerk van alle fysica; uiteindelijk blijven de primaire processen een mysterie voor ons, alleen hun wetmatigheden zijn op te sporen. Echter, er is een pleister voor deze psychologische wonde. Zijn eenmaal diverse soorten interacties via experimenteel onderzoek bekend in termen van hun sterkte, dan brengt deze kennis eenheid in de verscheidenheid op het cosmische toneel van mobilen. Hun bewegingen zijn zelfs te voorspellen.

Deze overweging voert tot het inzicht dat (los van eindexamen eisen) dynamica onderwijs niet alleen kan bestaan uit het opsporen van de universele interactieregel. Ook het onderzoeken van interacties in termen van hun sterkte ($\frac{dmv}{dt}$) en het vervolgens benutten van de gevonden wetmatigheden om bewegingen te voorspellen, behoort tot het domein van dynamica onderwijs. Materiaal, t.b.v. dit deel van het dynamica onderwijs moet verzameld/ontwikkeld worden (3).

Aan bovenstaand 3-punten programma wordt sinds enige tijd gewerkt door studenten, leraren en medewerkers betrokken bij de afdeling didactiek natuurkunde van de K.U.N. Het ligt in de bedoeling te zijner tijd te rapporteren over de resultaten.

Noten

1. Deze vertaling van de *leges motus* is overgenomen uit *Newton's Principa* van H.J.E. Beth (Noordhoff, 1932).
2. Ernst Mach schrijft in zijn *Die Mechanik* dat Newtons formulering van de drie bewegingswetten vervangen kan worden door een veel eenvoudiger, methodisch meer geordende en bevredigende formulering. De formulering die Mach dan geeft, is vrijwel identiek met onze formulering in termen van interactieregels. Zie het opstel *Overzichtelijke kritiek op de formuleringen van Newton* in Mach, *Natuurkunde, Wetenschap en Filosofie* (Boom, 1980).
3. Het voorspellen van bewegingen is in school te doen m.b.v. het inzichtelijke, eenvoudige constructieprogramma van de 17e eeuw Isaac Beeckman (zie Dijksterhuis, *De mechanisering van het wereldbeeld*). Nodig zijn slechts papier, potlood, lineaal en geduld. Wie het laatste niet heeft, kan het constructieprogramma laten uitvoeren door de computer; binnen enkele seconden verschijnen de banen van planeten, kometen, ruimteschepen, electronen, etc. op het beeldscherm.

Literatuur

- Dijksterhuis, E.J. *De mechanisering van het wereldbeeld*. Amsterdam: Meulenhof, 1950.
- Dijksterhuis, E.J. *Val en Worp; een bijdrage tot de geschiedenis der mechanica van Aristoteles tot Newton*. Noordhoff, 1924.
- Ogborn, J.M. Momentum first: an alternative approach to newtonian dynamics. *The School Science Review*, 4, 53-64, 1965/66.