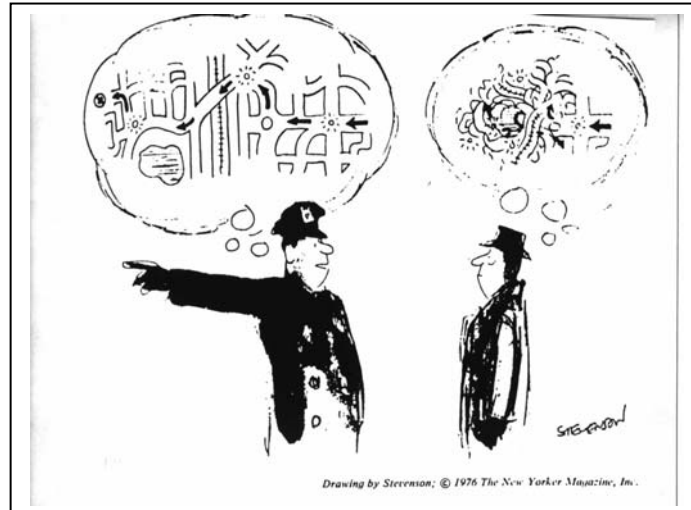


# Begrippen ontwikkelen, corrigeren, en inslijpen met snelle diagnose en feedback



Ed van den Berg

*Met bijdragen van*  
Rosea (Daday) van den Berg  
Nilo Capistrano  
Dick Hoekzema  
Cor van Huis  
Arni Sicam  
Loran de Vries

**AMSTEL Instituut**  
Universiteit van Amsterdam  
Kruislaan 404, 1098 SM Amsterdam  
e-mail: [e.vandenberg@uva.nl](mailto:e.vandenberg@uva.nl)

Workshop Antwerpen 21 april 2010

## Voorwoord

Begrippen groeien als plantjes, de docent moet ze regelmatig wat water geven. De moeilijkste begrippen moeten geregeld terugkomen. “Inslijpen” gaat niet in één keer. Er zijn begrippen waarbij het mogelijk is om *gedurende* de les heel snel fouten of misconcepties te detecteren van *veel leerlingen* **en** er *onmiddellijk* op te reageren door het gebruik van opgaven met schetsen, grafieken, of plaatjes als antwoord. *Leerlingen kunnen dan hun eigen vooruitgang zien, terwijl de docent allerlei gedachtecronkels van leerlingen op het spoor komt.* En het is erg leuk om dit af en toe te doen. In de workshop wordt deze “diagnose en feedback in *real time*” aan de hand van voorbeelden geïllustreerd. Voorbeeld lesmateriaal voor diverse onderwerpen is beschikbaar.

We ontwikkelden onze snelle feedback methoden in de Filippijnen (1996-2002) waar onze studenten klaargestoomd moesten worden voor les geven aan 60 – 70 leerlingen per klas. Hoe kun je dan toch aandacht schenken aan begripsproblemen van individuele leerlingen? Ook wijzelf en onze universitaire collega’s hadden grote klassen van 35 – 60 studenten. De snelle feedback methoden werden ontwikkeld om de meest voorkomende begripsproblemen snel te diagnosticeren en er tijdens de les op te kunnen reageren.

Het boekje start met een artikel uit NVOX over snelle feedback. Dan volgen mechanica voorbeelden over kinematica (Engels) en krachtendiagrammen (Nederlands). Een artikel over papierenschakelingen met snelle feedback is misschien wat raar, maar het leidde destijds bij mij in de klas wel tot spectaculaire verbetering in het meten in schakelingen. Dan volgen er enkele snelle feedback werkbladen (Nederlands) over schakelingen uit de 2007 versie van NiNa Domotica. Dit wordt gevolgd door enkele opgaven in het Engels die verschillende formats voor snelle feedback illustreren. Een misconceptie toetsje voor licht is opgenomen (Engels), aardig om eens af te nemen in de onderbouw of in klas 4. Het ordenen (“ranking”) van een grootte zoals stroomsterkte in verschillende schakelingen, of versnelling in verschillende situaties is een aantrekkelijke manier om begripsdenken van leerlingen te stimuleren die tegelijk mogelijkheden geeft voor diagnose en snelle feedback. Het hoofdstukje over ordenen is nog ruw en “onder constructie”. Tenslotte is er nog een voorbeeld van introductie van elementaire deeltjes reacties en standaardmodel via snelle feedback. Een Engelstalige docentenhandleiding gaat vooraf aan een Nederlands werkblad voor twee lessen Dit voorbeeld uit de moderne natuurkunde werd ontwikkeld door Dick Hoekzema en Ed van den Berg in het Project Moderne Natuurkunde (PMN) en is met succes uitgetprobeerd in PMN scholen.

Commentaar, suggesties, en ervaringen graag naar [e.vandenberg@uva.nl](mailto:e.vandenberg@uva.nl) (Ed van den Berg)

Dit boekje en enkele diagnostische toetsen staan tijdelijk op:

<http://staff.science.uva.nl/~eberg/Antwerpen2010>

### Omslag

De politie/docent geeft instructies aan de dame/leerling. De plattegrond kopieert zich niet simpel naar haar hersenen. De dame moet de plattegrond zelf in haar hoofd *reconstrueren*. Die reconstructie gaat gepaard met fouten en die kunnen alleen maar ontdekt en gecorrigeerd worden door *interactie*. Het constructieproces kan effectiever gemaakt worden door te vragen naar voorkennis (wat herinnert de dame zich van een vroeger bezoek?), door schetsen van een kaartje, door instructies in te oefenen. Er zijn ook *shortcuts* zoals de dame in een taxi zetten, maar deze shortcuts resulteren niet in leren.

## Inhoud

|                                                                                             |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Voorwoord.....                                                                              | i  |
| Inhoud.....                                                                                 | ii |
| Onmiddellijke Diagnose en Feedback in Natuur- en Scheikundelessen.....                      | 1  |
| Kinematics Graphs and Instant Feedback.....                                                 | 8  |
| Krachtendiagrammen, Begripsproblemen en Snelle Feedback.....                                | 11 |
| Paper Circuits to Short-Circuit Practice in Electric Circuit Making.....                    | 14 |
| Examples of Different Fast Feedback Formats for Electric Circuits.....                      | 17 |
| Diagnostic Test on Light.....                                                               | 21 |
| Worksheet on Phase Changes and Particulate Nature of Matter.....                            | 23 |
| Fast Feedback met Ordeningsvraagstukken (Ranking Tasks).....                                | 25 |
| Three Lessons on Conservation Laws, Symmetries, and Elementary<br>Particles in Grade 12.... | 30 |
| Werkblad Behoudswetten, Symmetrieën en Reactiediagrammen.....                               | 35 |

# Onmiddellijke Diagnose en Feedback in Natuur- en Scheikundelessen<sup>1</sup>

Ed van den Berg  
Toen: University of San Carlos  
Cebu City, Filippijnen

Nu: AMSTEL Instituut  
Universiteit van Amsterdam  
Nederland

In een typisch leerproces zijn docenten en leerlingen een paar weken met de stof bezig en dan wordt er getoetst. Tijdens dat “bezig zijn” met lesgeven en leren, is er natuurlijk interactie. De docent ontdekt foute antwoorden en reageert. Maar toch is ontdekking van misconcepties en docentenreactie daarop incidenteel en blijven veel “alternatieve” gedachtegangen van leerlingen verborgen. In sommige onderwerpen zijn er echter mogelijkheden om *gedurende* de les heel snel fouten of misconcepties te detecteren van *veel leerlingen* en er *onmiddellijk* op te reageren.

Het eerste voorbeeld is saai, maar duidelijk. Stel je voor, een heerlijk ouderwetse, klassikale les met 30 leerlingen (wat ik beschrijf doen wij hier in de Filippijnen met 60 leerlingen per klas en ik heb het ook een keer met 90 gedaan).

## Grafieken

Stel je wilt als docent scheikunde, biologie, of natuurkunde even snel zien of je leerlingen voldoende kennis en vaardigheden hebben van grafieken om daar vervolgens gebruik van te maken. We beperken ons even tot rechte lijnen, maar een soortgelijke les kan gedaan worden met trigonometrische, exponentiële, of logaritmische functies.

**Docent:** *Teken een simpel assenstelsel in je schrift en schets de grafiek  $f(x) = x$ .*

*Gebruik gelijke eenheden op beide assen.*  
De docent kan als voorbeeld een assenstelsel schetsen op het bord om te voorkomen dat leerlingen teveel tijd steken in het assenstelsel en te weinig in de grafiek zelf.

Direct na de instructie loopt de docent de klas rond om te controleren dat iedere leerling bezig is en niet tijd verknoeit aan het mooi maken van een coördinatensysteem en het vermijden van de eigenlijke taak. Vervolgens kijkt de docent of er inderdaad een rechte lijn onder 45 graden met de x-as uit komt.

**Docent:** *Schets nu in dezelfde figuur de grafiek van  $f(x) = 2x$  (of  $y = 2x$ ). Een schets is voldoende, het is niet nodig precies te meten.*

Terwijl de leerlingen bezig zijn, loopt de docent weer door de klas en ziet in één oogopslag of een leerling een steilere of minder steile grafiek tekent vergeleken met  $f(x) = x$ . De docent heeft zelfs tijd voor korte individuele interviews met één of twee leerlingen. Die interviews kunnen uiterst nuttige informatie opleveren voor een plenaire reactie op leerlingfouten. Leerlingen die al klaar zijn, kunnen hun antwoorden met die van burens vergelijken en ze doen dat meestal automatisch. De docent kan nu direct plenair ingaan op veel gemaakte fouten en de redeneringen achter die fouten.

De volgende opdracht is natuurlijk  $f(x) = \frac{1}{2}x$  te tekenen, in dezelfde figuur.

Wederom loopt de docent rond en checkt in een paar seconden een stuk of 15 leerlingen en vraagt hier en daar een leerling met een fout antwoord om verheldering.

Weer volgt een plenaire reactie op frequente fouten.

De volgende opdracht is om  $f(x) = x - 5$  te tekenen. Etc.

Deze herhaling van lineaire grafieken kan afgesloten worden met  $f(x) = ax + b$  en de

<sup>1</sup> Gepubliceerd in NVOX, 26(8), 407-410 (oktober 2001). Destijds werkte ik nog in de Filippijnen met grote klassen.

betekenis van de richtingscoëfficiënt “a” en de constante “b”.

Het zal duidelijk zijn dat eenzelfde les mogelijk is over  $f(t) = A \sin(2\pi ft + c)$  of  $f(t) = Ae^{kt}$ , of andere functies.

Als bij de eerste opdrachten blijkt dat vrijwel alle leerlingen het goed doen, dan staakt de docent de activiteit en gaat hij/zij meteen over op de activiteit waarin de grafieken *gebruikt* gaan worden. Aan de andere kant, als er serieuze problemen zijn, dan is er even wat extra oefening nodig en dan kan dat in de vorm van 1) een nieuwe opgave, 2) zelfwerk met een rondgaande docent, 3) onmiddellijke plenaire reactie. De docent *moet* rondgaan en niet aannemen dat hij of zij alle leerlingfouten al weet. De korte interviews tijdens de rondgang zijn uiterst belangrijk en vormen de ideale voorbereiding op de plenaire uitleg. Bovendien zijn die interviews interessant, het zout in de pap voor een docent.

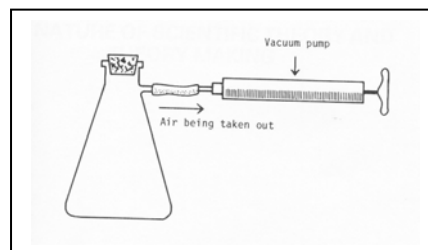
De kracht van de methode ligt in de snelle diagnose gecombineerd met *onmiddellijke* individuele (interviewtje) en plenaire feedback. De ijverige docent die 's avonds achter een toren schriften zit om iedere leerling individueel commentaar op huiswerk of een toets te geven, is toch nog altijd een paar dagen te laat met de feedback. De leerling kijkt misschien niet eens naar al die rode half leesbare docentfeedback op hun werk. *Onmiddellijke* feedback werkt veel beter. Enkele jaren geleden deden Paul Black<sup>1</sup> en collega's in Engeland een literatuur studie over de effecten van formatieve evaluatie (zeg maar feedback op leerlingwerk zonder cijfers). De effecten van wel of geen feedback op leerlingwerk bleken veel groter te zijn dan andere variabelen in het leerproces zoals lesmethode X of Y. We gaan verder met andere voorbeelden uit de natuur- en scheikunde.

## II. Tekeningen: Lessen over Gassen

De volgende voorbeelden komen uit het werk van Novick en Nussbaum<sup>2</sup> Na een

korte introductie over gassen kan de docent(e) de volgende opdracht geven:

**Docent:** *Stel dat je een fles hebt die gevuld is met lucht (figuur 1). Teken de lucht in de fles. (Men zou ook kunnen vragen Teken de luchtmoleculen in de fles al duwt die instructie de leerlingen al een beetje in de richting van deeltjes).*



Figuur 1: De fles.

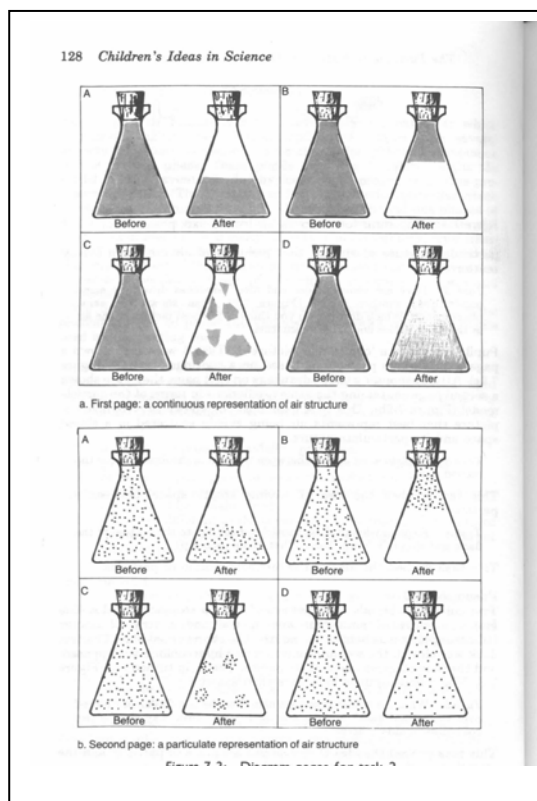
Nadat leerlingen dit gedaan hebben, volgt de tweede taak:

**Docent:** *Nu wordt met een rietje of met een pompje een deel van de lucht uit de fles gezogen en daarna wordt de fles weer gesloten. Teken de luchtmoleculen nadat er wat lucht uit de fles gezogen is.*

De resultaten uit het onderzoek van Novick en Nussbaum<sup>3</sup> zijn zichtbaar in figuur 2

Gedurende het tekenen loopt de docent door de klas en vraagt leerlingen om verheldering bij hun tekeningen. *De docent leert hoe leerlingen zich gasmoleculen voorstellen.* Leerlingen die klaar zijn leggen intussen hun tekeningen aan elkaar uit. De activiteit wordt plenair voortgezet met tekeningen op het bord en leerlingen die hun voorstelling van lucht moleculen en het effect van wegzuigen van lucht uitleggen. De tekeningen in figuur 2 laten werk zien van onderbouwleerlingen in diverse landen.

Figuur 2: Hoe leerlingen luchtmoleculen tekenen voor- en nadat er wat lucht uit de fles gezogen is.

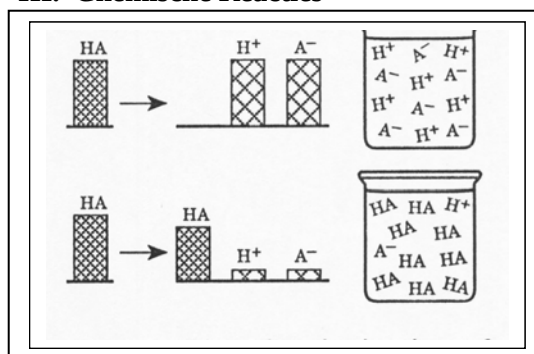


Leerlingideeën hebben o.a. te maken met de volgende vragen: a) is materie continu of bestaat het uit deeltjes?, b) wat is er tussen de deeltjes?, c) zijn de deeltjes in een gas geordend of in chaos? d) hoe stel je je random beweging van gasdeeltjes voor?, e) hoe komt dat deeltjes zich *onmiddellijk* verspreiden over lege ruimte? De bovenste 8 tekeningen zijn getekend door leerlingen die materie als continue lijken te zien, terwijl de onderste 8 tekeningen een duidelijk deeltjeskarakter laten zien.

Uiteraard moet de docent niet alleen weten hoe je snel feedback verzamelt via deze tekeningen. De docent moet ook verschillende manieren paraat hebben om gasdeeltjes “aanschouwbaar” te maken. Daarvoor zijn diverse analogieën beschikbaar. Bijvoorbeeld, wat zijn de overeenkomsten *en verschillen* tussen gasdeeltjes in een fles en mensen in een grote disco? Bij dat soort vragen is het handig om de vraag even in kleine

groepjes te laten bespreken en te luisteren naar leerlingideeën en vervolgens de opgedane kennis van leerlingdenken te gebruiken om plenair te reageren. **De snelle feedback werkt naar twee kanten. De docent kan zeer snel reageren op leerlingideeën: de leerling krijgt snel feedback van de docent. De docent kan ook heel snel uitvinden hoe zijn of haar les overkomt: de docent krijgt snel feedback van de leerlingen op zijn of haar les!**

### III. Chemische Reacties



Figuur 3: Een sterk zuur en een zwak zuur in oplossing<sup>4</sup>.

In de scheikunde gebruiken leerlingen onbewust hun eigen modellen over hoe deeltjes zich gedragen. Die eigen modellen kunnen sterk afwijken van de wetenschappelijke modellen. Wederom is het handig leerlingen te laten tekenen. Soms is het nodig om samen wat af te spreken over te gebruiken symbolen om de manier van tekenen wat te stroomlijnen en de zaken voor de docent en medeleerlingen interpreteerbaar te houden.

De mogelijkheden voor het tekenen van chemische voorstellingen zijn legio. Bijvoorbeeld, teken deeltjes in oplossing van keukenzout in water. Teken een azijnzuuroplossing en een zoutzuuroplossing in water. Je zou zelfs leerlingen kunnen vragen de verschillen tussen zoutzuur en azijn in de tekening duidelijk te laten uitkomen, opdat ze nadenken over dit verschil. Een docent wil hier zien of leerlingen doorhebben dat azijnzuur slechts gedeeltelijk gedissocieerd is terwijl zoutzuur volledig in ionen is opgesplitst (Figuur 3).

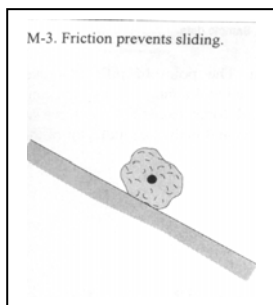
De docent gaat opnieuw rond en ziet de diverse tekeningen en stelt vragen om achter de leerlingmodellen te komen. Vervolgens volgt een plenaire discussie waarin leerlingmodellen gecontrasteerd worden met het wetenschappelijk model. De korte interviews met leerlingen gedurende de rondgang helpen om de plenaire discussie dichterbij de leerlingen te brengen.

#### IV. Een Natuurkundevoorbeeld:

##### Krachtendiagrammen

Begrip van krachten is onontbeerlijk in succesvolle toepassing van Newton's wetten. Mijn collega's en ik doen al jaren aparte oefeningen met de zogenaamde "free-body force diagrams" waarbij we de krachten op een object tekenen.

*Plenaire:* Van de vector diagrammen weten leerlingen nog dat je een kracht door een pijl kunt voorstellen die een bepaalde lengte (evenredig met grootte) en richting heeft. Ze weten ook dat je vectoren op kunt tellen tot een resultante vector. We benadrukken dat een resultante kracht anders moet worden voorgesteld, bv. door een dubbele pijl. Een voorbeeld van krachten tekenen wordt even plenair gedaan.



Figuur 4: Steen op hellend vlak, in rust.  
a. Het probleem

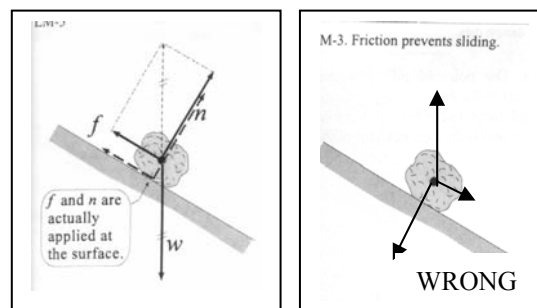
*Individueel:* Vervolgens krijgen leerlingen een werkblad met tekeningen van situaties en moeten ze de krachten op het voorwerp tekenen. Figuur 4 laat een steen zien op een hellend vlak. Wrijving voorkomt naar beneden glijden. De tekeningen komen van de bekende plaatjes van Jim Court<sup>5,6,7</sup>. De 1993 versie heeft ooit in NVOX gestaan<sup>8</sup>.

De docent gaat rond en ziet prachtige fouten die allemaal uiterst verklaarbaar zijn en netjes gecategoriseerd kunnen worden in misconceptie categorieën. Toch is het ook hier belangrijk enkele leerlingen te ondervragen over hun tekening. Dat interview is de beste oefening voor de latere plenaire bespreking.

*Plenaire:* Diverse krachtendiagrammen worden besproken waarna de leerlingen weer individueel doorgaan met de oefeningen. Eerst statische situaties, dan dynamische met constante snelheid, dan dynamische met versnelling, en dan een mengsel van situaties.

4b. De oplossing

4c. De fouten



Meer nuttige details over krachten tekenen en enkele vuistregels kunt u vinden in een eerder artikel<sup>9</sup>. Mijn collega's en ik doen de krachtendiagrammen in mechanica, maar we komen er later tijdens andere onderwerpen regelmatig op terug. Twee jaar na de introductie van de diagrammen, doen studenten het nog steeds goed. De krachtendiagrammen zijn één van de meest succesvolle onderdelen van ons natuurkunde programma en leiden tot een beter begrip van de wetten van Newton.

#### VII. Moleculaire Structuur, Chemische Formules, Lewis Structuren.

In lessen over organische moleculen kun je leerlingen eenvoudige molecuulstructuren laten tekenen. Bijvoorbeeld, teken een alkaan met 4 C atomen, of teken 2-methyl-butaan, of buteen, of benzeen. De docent loopt snel rond om te zien wat leerlingen er van bakken. Wederom is directe individuele en plenaire feedback mogelijk.

Men kan leerlingen ook Lewis-structuren

Onlangs lieten we onze leraaropleiding studenten wat stralendiagrammen maken met vlakke spiegels. Ze hadden dat een jaar eerder uitgebreid gehad. Terwijl mijn collega en ik rondliepen, zagen we dat een derde van de studenten het beeld op de spiegel tekenden i.p.v. erachter. Dat hadden we niet meer verwacht. Korte interviews gaven aan dat studenten verschillende argumenten hadden voor hun foute tekening. Gedurende de plenaire bespreking kwam de eerste vrijwilliger meteen met het juiste stralendiagram en de juiste beeldlocatie. Als we niet de klas waren rondgegaan, hadden we niet geweten dat 1/3 van de studenten de fout in gingen. Nu we dat wel wisten, konden we op de problemen ingaan. Kijk naar leerling-werk, maar doe dat vooral tijdens de les.

laten tekenen. Laat ze diverse moleculen tekenen en de gemiddelde plaats/rol van valentie elektronen aangeven. Laat ze zowel ionische als covalente moleculen tekenen. Na een minuut of twintig zullen resultaten merkbaar beter worden. Je zou ook kunnen vragen wat de beste representatie is voor HF:  $H:F$  of  $H:F$  of  $H:F$ , of  $H:F$  en waarom. In een onderzoek aan een Amerikaanse universiteit bleek dat 25% van de practicumassistenten (meestal aio's werkend aan een promotie in scheikunde) hun keuze niet juist kon toelichten. Ook in deze activiteit is het mogelijk voor de docent om in iets meer dan een seconde 10 leerlingen te checken. Er is zelfs tijd om kleine interviewtjes er tussendoor te doen om leerlingantwoorden beter te begrijpen en alvast te oefenen in uitleg voor de plenaire bespreken van antwoorden.

### VIII. Gebruik van meerkeuzevragen als lesmethode

Een andere snelle feedback methode is het gebruik van meerkeuze vragen. Leg een typische misconceptie vraag op de OHP. Leerlingen kiezen een antwoord en beargumenteren dat in hun schrift. Dan volgt discussie van paren of kleine groepjes. Als er veel variatie is in

antwoordkeuzes, dan zal er heftige discussie zijn. Dan krijg je ook "peer teaching", leerlingen die aan elkaar uitleggen en elkaar helpen bij het begrijpen van natuur- of scheikunde. De docent gaat rond, luistert, heeft interactie met groepjes, en de docent kan eventueel de discussie plenair maken. Mazur<sup>10</sup>, een natuurkunde professor van Harvard, en een vrij grote groep andere docenten in hoger onderwijs in de VS gebruiken deze methode bij klassen met zelfs 200 – 300 studenten.

### IX. Predict-Observe-Explain Demonstraties

Er zijn veel demonstraties met uitkomsten die anders zijn dan leerlingen verwachten, de zogenaamde "discrepant event" demonstraties. Bijvoorbeeld, het gelijktijdig laten vallen van een grote en een kleine steen. *Welke steen komt het eerst op de grond?* Leerlingen kunnen hun individuele voorspellingen opschrijven en schriftelijk uitleggen. Die uitleg is belangrijk om gokken te voorkomen. Vaak kan een voorspelling en de uitleg zeer kort worden opgeschreven, soms zelfs in de vorm van twee meerkeuze vragen, één voor de voorspelling en één voor de uitleg. Wederom gaat de docent de klas rond. Dan volgt het experiment en het wordt herhaald totdat alle aanwezigen overtuigd zijn van de uitkomst. Vervolgens moeten leerlingen weer individueel die uitkomst verklaren, op papier en de docent gaat rond. Het boek van Liem<sup>13</sup> is een bron voor 400 van dit soort experimenten. De POE methode wordt prachtig beschreven in White & Gunstone<sup>14</sup>. Veel typische misconceptievragen in de natuurkunde lenen zich voor POE experimenten.

### Samenvattend

Docent feedback op leerling ideeën (zonder cijfers te geven) is een van de meest krachtige invloeden op leren. Hoe sneller de feedback, hoe beter. Dit artikel illustreerde een aantal manieren om zeer snel ideeën van veel leerlingen te diagnosticeren en erop te reageren. Voordelen zijn snelle feedback aan

leerlingen op hun gedachtespinsels, snelle feedback aan de docent of, en hoe de les overkomt, en tenslotte, de gebruikte methode om snelle feedback te verzamelen stimuleert ook vergelijking van antwoorden tussen leerlingen waarbij leerlingen elkaar antwoorden uitleggen (peer teaching).

### Literatuur

1. Black, P. (1998a). Formative Assessment: A review of Evidence and Theory. Paper presented at the Annual Conference of the National Association of Research in Science Teaching, San Diego, April 1998.
2. Black, P., D. William (1998b). Assessment and Classroom Learning. *Assessment in Education*, 5(1).
3. Novick, S., & J. Nussbaum. (1982). Brainstorming in the classroom to invent a model: a case study. *School Science Review*, 62, 771-778.
4. Driver, R., E. Guesne, A. Tiberghien (1985). *Children's ideas in science*. Open University Press.
5. Orna, M.V. et al. (1994). ChemSource. American Chemical Society, Washington.
6. Court, J.E. (1993). Free-Body Diagrams. *The Physics Teacher*, 31, 104-108.
7. Court, J.E. (1999a). Free-Body Diagrams Revisited – I, *The Physics Teacher*, 37(7), 427-433.
8. Court, J.E. (1999b). Free-Body Diagrams Revisited – II, *The Physics Teacher*, 37(8), 495.
9. Verhagen, P. (1995). Krachten tekenen. *NVOX*, 20(2), 79-82.
10. Berg, E. van den, C. van Huis (1998). Het tekenen van krachten. *NVOX*, 23(1), 18-19.
11. Mazur, E. (1997). *Peer Teaching*. New York, Wiley.
12. Huis, C. van, Berg, E. van den (1993).

### Onderwerpen met mogelijkheden voor snelle feedback

#### Scheikunde

1. Teken van molecuulstructuren.
2. Aangeven van lading op moleculen (polair versus niet-polair, bv water).
3. Teken van elektronenconfiguraties (Lewis structuur).
4. Moleculen in oplossing.
5. Schrijven van molecuulformules bij gegeven naam en omgekeerd.
6. Reactiesnelheden en invloed van diverse factoren zoals fase, temperatuur, concentratie.
7. Tijdsverloop van concentratie vs tijd bij evenwichtsreacties en verschuivingen van chemisch evenwicht, bv. door verandering van temperatuur.
8. Grafieken van bindingsenergie vs atomaire afstanden voor diverse soorten moleculen en complexen.

#### Natuurkunde

1. Kinematische grafieken (x, t), (v,t), (a,t).
2. Krachtendiagrammen.
3. Vloeistofniveaus in vloeistof problemen (bv. twee maatcilinders met elk 40 cm<sup>3</sup> water. We voegen aan de één 5 cm<sup>3</sup> lood toe en aan de ander 5 cm<sup>3</sup> aluminium. Teken de vloeistofspiegel na toevoeging.)
4. Gassen.....tekenen gasdeeltjes in verschillende situaties.
5. Gassen....grafieken voor ideale gassen bij toename en afname van de hoeveelheid gas of van andere variabelen.
6. Energie conversie diagrammen en energie input-inhoud-output diagrammen<sup>11</sup>, deze kunnen uiterst nuttig zijn in het probleem oplossen.
7. Geometrische optica, stralengang bij spiegels en lenzen.
8. Golfoptica en andere golven: golffronten bij terugkaatsing, breking, diffractie en andere vormen van interferentie.
9. Elektrostatica: tekenen van ladingen en ladingsverdeling op objecten zoals bollen, condensatoren, en elektroscopen.
10. Elektrostatica en magnetisme: tekenen van veldlijnen.
11. Elektrische schakelingen: Converteren van een foto van een echte schakeling in een schematisch diagram en omgekeerd. Teken van diagrammen van schakelingen met bepaalde functies, of geef een diagram en "hoe kun je de schakeling aanpassen zodat lampje 2 feller gaat branden en lampje 3 minder fel?" Weer krijgen we plaatjes als oplossingen die we in een oogwenk kunnen beoordelen.
12. Papier schakelingen<sup>12</sup>. Dit is een tussenvorm bij het converteren van een schakelingsschema naar een echte schakeling. Zie het artikel.

- Teaching energy: A systems approach.  
*Physics Education*, 28(3), 146-153.
13. Berg, E. van den (1999). Paper circuits to short-circuit practice in electric circuit making. *School Science Review*, 81(295), December 1999, 126-127.
  14. Liem, T. (1987). *Invitations to Science Inquiry*. Inquiry Enterprises. Chino Hills, California.
  15. White, R.T., & R. Gunstone. (1992). *Probing Understanding*. London: Falmer Press.

**Box 1: Stappen in snelle feedback**

1. *Klassikaal*: Introduceer het onderwerp, introduceer benodigde afspraken voor tekenen of schetsen met een voorbeeld.
2. *Klassikaal*: Presenteer eerste opgave.
3. *Individueel of in paren*: Eerste opgave
4. Docent controleert eerst of iedereen serieus gestart is.
5. Dan gaat docent rond om leerling werk te zien.
6. *Klassikaal*: Docent gaat kort in op belangrijkste fouten en misconcepties die hij/zij gezien heeft. Soms moeten ook afspraken over tekenen nog opnieuw gearticuleerd worden.
7. *Individueel*: Tweede opgave.
8. Docent gaat rond en heeft eventueel een kort interview met een leerling die een onverwacht antwoord geeft.
9. Wanneer leerlingen klaar zijn, laat ze antwoorden vergelijken of geef 2 of 3 opgaven tegelijk.
10. *Klassikaal*: Na elke opgave gaat de docent zeer beknopt in op de belangrijkste fouten en misconcepties. Houd de vaart erin. Kort en krachtig dus.
11. *En zo voort, doe dit voor een 20 minuten en ga dan over op een andere werkvorm.*

# Kinematics Graphs and Instant Feedback<sup>2</sup>

Ed and Rosea van den Berg, Nilo Capistrano,  
Arni Sicam  
Science and Mathematics Education Institute  
University of San Carlos  
Cebu City, Philippines 6000  
Edberg51@planet.nl

If we learned anything about “learning” over the past two decades, it is the importance of student conceptions and teacher – student feedback. The following kinematics activity is great fun and allows the teacher to assess student conceptions and react constructively to them.

## Introduction

Graphs play a big role in kinematics. They are an essential tool in describing and learning to understand motion. Teaching kinematics without graphs, as is so often done in Philippine schools, is like teaching woodcraft without hammers. Kinematics graphs also provide tools to probe students’ misconceptions in mechanics in a very straightforward way. In our teaching, this probing of student conceptions often consists of listening to students, but listening to one student is often very difficult when there are 50 or 60 students in a class. Sometimes one can use very visual activities and “see” student conceptions rather than listen to them, for example with kinematics graphs. The students draw graphs based on the motions of another student in front of the class. In a split second the teacher can see whether students draw the graph correctly or not. In just a few seconds the teacher can check on the work of some 10 – 20 students and will then be aware of the most prominent mistakes or misconceptions. The most common mistakes can be discussed in plenary. By doing a series of graphs and by reacting briefly to each successive graph in plenary before doing the next one, the teaching can be quick and effective, as the feedback on students’ performance is immediate. After a while, students may get bored of drawing graphs. Well, then give them graphs and let them (in small groups) play out the motion

represented in these graphs. By observing a group the teacher can right away “see” any conceptual problems students might have. Nowadays pretty computer programs are sold for this kind of kinematics graphing activities. However, it is more fun and perhaps more effective to do the role-plays with instant teacher feedback.

## Role-play

The teacher starts by choosing a reference point such as the leg of a table and the teacher stands one meter away from there, not moving. We ask students to draw the graph of teacher position versus time. Problem! The graph should be a straight horizontal line at one meter from the origin. Many of our students (and teachers) drew a dot only. This is an understandable but revealing mistake. With some explanation we proceed and go on to graphs of a) standing still, b) moving at constant speed, c) moving at greater speed, d) moving away and coming back, e) moving away and coming back at a different speed, f) moving away-stopping-coming back. All the time it is not a computer, but the students themselves who sketch the graphs. The teacher walks around and checks the correctness of a graph in a split second. Checking a representative class sample of graphs takes only some seconds and a quick individual interview of 10-30 seconds can quickly reveal the thinking behind wrong graphs. Typically an experienced teacher can check about 20 – 30 students for each graph before most participants are ready and it is time for plenary discussion of the graph and then presentation of the next graph.

From the displacement-time graphs one can go on to velocity-time graphs and acceleration-time graphs. The next step is to present example graphs and have small groups of students role- play the motions in the graphs. Also here, the instructor can see in a matter of seconds whether or not and how the group understood the graph. Typical graphs to role play could be: a) a horizontal line in a *position* versus *time* graph (standing still at a particular point), b) a slanting line (moving at constant velocity), c) an equilateral triangle (moving away and coming back at constant speed), d) a triangle with unequal sides (moving away and back but at different speeds), e) a trapezium (moving, stopping, returning, here at a lower speed), f) a horizontal line in a velocity versus time diagram (moving at constant velocity), etc. (some shown in figure 2). If the class picks up well, the teacher could go into more

---

<sup>2</sup> Published in the School Science Review (UK), December 2000, 82(299), 104-106.  
*Ooit uitgevoerd in een klas met 90 ongekwalificeerde docenten. Je zag het begrip groeien!*

complicated motions such as accelerated motion.

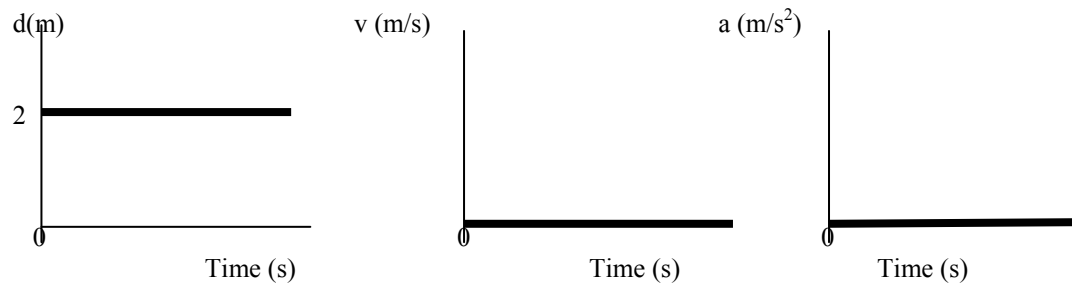


Figure 1a,b,c: Displacement-time (a), velocity-time (b) and acceleration-time (c) graphs for a person at a fixed location (at rest) 2 meters from the origin of the coordinate system.

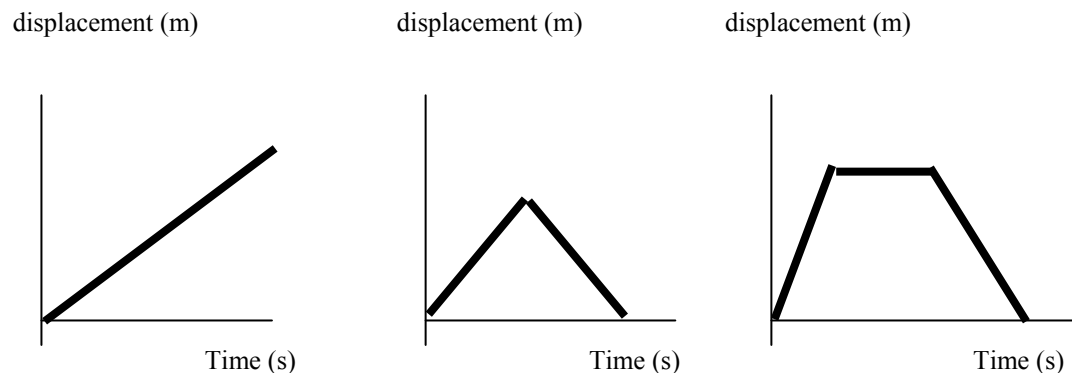


Figure 2: Displacement-time graphs for role-playing, a) walking away from the origin at constant speed, b) walking away and coming back, c) walking away, stopping, and coming back at a different speed.

### Box 1: Summary of an Interactive Lecture Demonstration

1. Students are ready with notebooks and ballpoints.
2. Teacher defines the origin of a coordinate system in front of the room (e.g. by placing a chair as origin and pointing out the one-dimensional displacement axis).
3. Teacher models the motion in the coordinate system, for example standing still.
4. Students sketch the displacement – time graph.
5. Teacher goes around to check and then discusses the solution and the wrong student solutions in plenary.
6. Repeat points 3-5 for another motion, etc.
7. Now student are given a displacement – time graph and are asked to model the motion. This could be done as small group activity, or by student pairs in their seats with their finger modeling the motion on paper. The teacher observes and reacts.
8. In plenary the teacher discusses the major problems observed in the small group work.
9. After practicing displacement-time graphs, the teacher can then take examples where students have to sketch both displacement –time graphs and velocity time graphs.

### Lack of space

In case the classroom or school does not have the space for role-plays of student groups, one can also have students do this in their seats. Then one could form groups of three neighboring students. One student could trace the motion described by the graph using the finger instead of his body. Also with

this method the teacher can immediately see whether the finger motion correctly shows the motion described by the graph.

While going back and forth between graph making and role-playing of given graphs, understanding grows. The key advantage of this teaching method is the possibility of *immediate feedback* from the instructor to a *maximum* number of individuals plus lively discussion between students in unusual and thus not boring tasks.

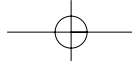
In the end the teacher can test the understanding by presenting some graph items in a quick post-test. There is an excellent Test of Graphing by Beichner of the Physics Department of the University of North Carolina.

### Experiences

We have done the graphing-immediate feedback role-plays with students and with Physics teachers who lack Physics qualifications, and with Physics faculty in our university. Once we did role-plays with 90 teachers at the same time in a hotel conference room. The method works very well when done in small steps (a – f above). With Physics College faculty we started with computer generated graphs and ultra-sound position sensors, however, they found the people - graph method without computer more fun.

### References

- Beichner, R.J. (1996). Test of Understanding Graph-Kinematics. Department of Physics, North Carolina State University, Raleigh, NC 27695-8202.
- Sokoloff, D.R., R.K. Thornton (1997). Using interactive lecture demonstrations to create an active learning environment. *The Physics Teacher*, 44(12), 340-347.
- Thornton, R.K., D.R. Sokoloff (1998). Assessing student learning of Newton's laws: The force and motion conceptual evaluation and the evaluation of active learning laboratory and lecture curricula. *American Journal of Physics*, 66(4), 338-352.



# Krachtendiagrammen, begripsproblemen en snelle feedback

Begrippen groeien als plantjes, de docent moet ze regelmatig wat water geven. De moeilijkste begrippen moeten geregeld terugkomen. 'Inslijpen' gaat niet in één keer. Even 10 – 15 minuten een paar krachtendiagrammetjes doen met snelle feedback<sup>1</sup> en leerlingen zijn weer wat verder met het krachtbegrip.

■ Ed van den Berg / AMSTEL Instituut en Katrina Emmett / FISME, Universiteit Utrecht

Geen tijd om het leerlingen zelf te laten doen en feedback erbij te geven? Kom nou, het gaat om een paar keer 10 minuten en bij deze methode kunnen leerlingen hun eigen vooruitgang zien. Dat stimuleert en levert winst op in begrip en motivatie! We geven stapsgewijs de methode aan. Uiteraard kunt u zelf eigen krachtenplaatjes toevoegen, bijvoorbeeld uit *The Physics Teacher*<sup>3,4</sup> en *NVOX*<sup>5</sup>. Snelle feedback is bruikbaar bij allerlei onderwerpen in de natuurkunde<sup>1</sup>.

## Conventies voor krachten tekenen<sup>2</sup>

Leerlingen hebben eerder met krachten te maken gehad en met het grafisch optellen van vectoren. Daarbij zijn mogelijk de volgende afspraken gemaakt: krachten worden getekend als een pijl

- die aangrijpt op een voorwerp en begint **in** dat voorwerp (hoewel wrijvingskrachten en normaalkrachten aangrijpen aan het oppervlak, worden ze **in** het object getekend opdat duidelijk is op welk object ze werken);

- die wijst in de richting van de kracht;
- met een lengte die de grootte van de kracht aangeeft;
- waarbij het voorwerp dat de kracht uitoefent en het voorwerp waarop de kracht werkt worden aangegeven, dus  $F_{\text{aarde op baksteen}}$ .

De resultante is de som van alle krachten op een voorwerp en wordt met een dubbele pijl ( $\Rightarrow$ ) aangegeven om het verschil duidelijk te maken met afzonderlijke krachten.

**Voorbeeld 1.** Figuur 1a laat een baksteen zien in vrije val als we wrijving verwaarlozen. De pijl grijpt aan binnen het voorwerp en laat duidelijk zien op welk voorwerp de kracht werkt.

**Voorbeeld 2.** Figuur 1b laat een baksteen zien die naar rechts over de vloer glijdt en wrijving ondervindt. De pijl start **in** het voorwerp (baksteen) om overduidelijk te maken op welk voorwerp de kracht werkt. De precieze locatie van het aangrijpingspunt of de werklijn is alleen van belang

voor momenten en rotaties. Alleen de wrijving is getekend. Andere krachten zijn niet getekend. De getekende snelheidsvector (gestippeld) verschilt van de krachtenpijl.

**Voorbeeld 3.** Figuur 1c laat de krachten zien op een steen die door twee touwtjes in een statische positie wordt gehouden.

## De snelle feedbackmethode:

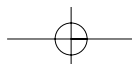
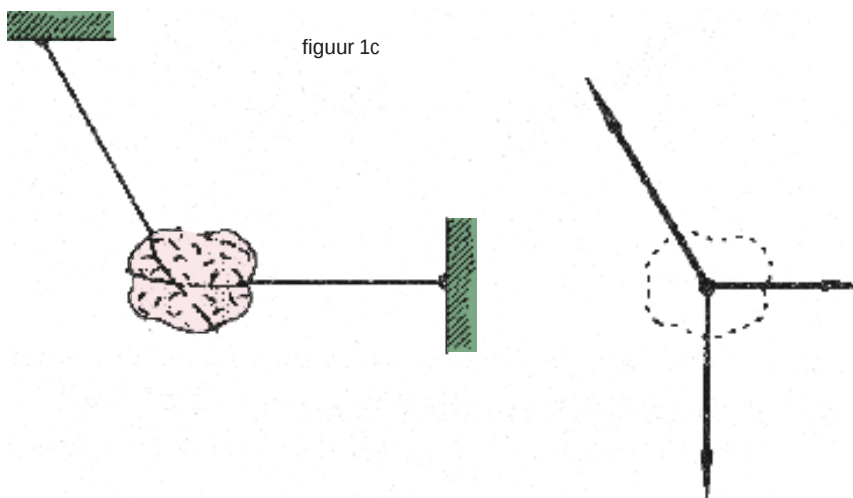
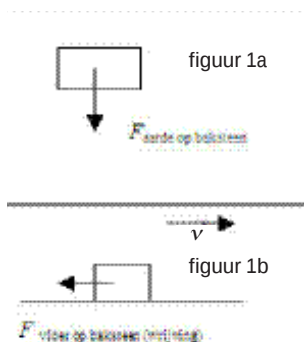
Stap 1: Docent geeft het probleem (via bord of OHP).

Stap 2: Docent controleert of ieder aan het werk is en treedt op waar dat niet het geval is.

Stap 3: Docent loopt rond en ziet een stuk of 10 oplossingen in een minuut en kan een leerling met een onverwacht antwoord even vragen om uitleg (individueel). Ondertussen beginnen andere leerlingen spontaan resultaten te vergelijken en dus elkaar les te geven!

Stap 4: Docent presenteert beknopt één of twee meest voorkomende fouten en legt uit wat er mis mee is.

Krachtendiagrammen tekenen.



Stap 5: Docent presenteert het volgende probleem.

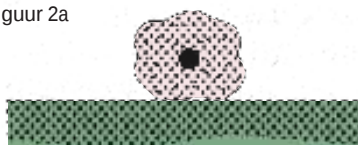
Stap 6: Docent gaat rond.

Houd de gang erin! Doe de opgaven in stappen met klassikale terugkoppeling en laat NIET alle opgaven tegelijk maken. De stapsgewijze verbetering werkt zeer motiverend.

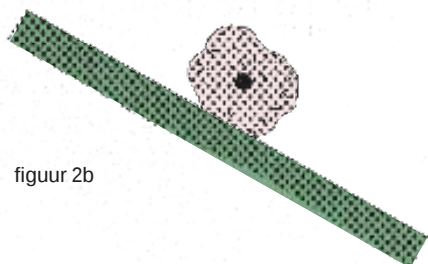
OPGAVEN<sup>3,4,5</sup>: Teken in alle gevallen alleen de krachten **op de steen** door middel van pijlen met correcte richting en grootte (ten opzichte van andere krachten) en label van ... op *steen*.

### Statische situaties

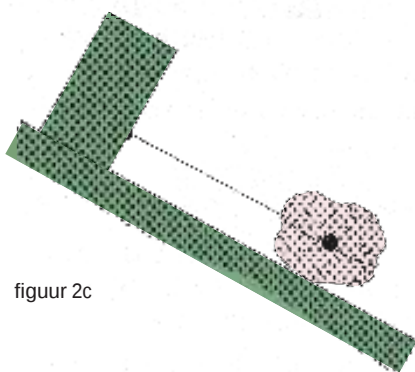
figuur 2a



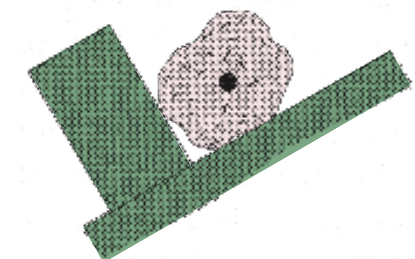
figuur 2b



figuur 2c



figuur 2d



Krachtendiagrammen in statische situaties.

### Veelvoorkomende fouten

- Alleen  $F_{\text{aarde op steen}}$  wordt getekend in figuur 2a en  $F_{\text{oppervlak op steen}}$  (normaalkracht) wordt vergeten. Dit zou resulteren in een vrije val.
- Bijvoorbeeld de zwaartekracht wordt loodrecht op het schuine vlak getekend in plaats van verticaal in figuur 2b. Of de normaalkracht wordt verticaal getekend in plaats van loodrecht op het vlak. Het is belangrijk aan te geven wat de *oorzaak* van de normaalkracht is. Deze is het gevolg van microscopische vervorming van het oppervlak door de steen. Het is dus een gewone Hooke-kracht (ingedrukte oppervlaktelaag) of zelfs elektrostatische kracht (ingedrukte elektronenverdeling van oppervlakteatomen). We demonstreren wel met schuimrubber om dit effect uit te vergroten en aanneemelijk te maken.
- De wrijving van oppervlak op steen wordt vaak de verkeerde kant op getekend in figuren 2b t/m 2d.
- Figuur 2c: Zowel wrijving ( $F_{\text{oppervlak op steen // (wrijving)}}$ ) als kracht van touwtje op steen ( $F_{\text{touwje op steen}}$ ) moeten dezelfde kant opwijzen en de som is gelijk aan  $mg \cos \alpha$ .

**Conclusie en recept voor leerlingen:** Als je weet dat de snelheid nul is en blijft (statische situatie), dan moet de som van alle krachten nul zijn. Als dat in jouw figuur niet zo is, dan klopt er iets niet in het krachtendiagram.

### Actie-reactieplaatjes

In bovenstaande diagrammen gaat het steeds alleen om de krachten op de steen, het 'free-body' diagram. Het is nuttig enkele diagrammen nog een keer te doen, maar nu juist alle actie-reactieparen aan te geven. Daarbij is steeds de ene kracht van het paar een kracht van *touwtje op steen*, of *oppervlak op steen* en de andere kracht van het paar *steen op touwtje*, of *steen op oppervlak*, etc. Het handige van de gevolgde notatie is dat je de reactiekracht krijgt door de volgorde **van...op...** om te keren. Door aangrijpingspunten binnen de voorwerpen te tekenen, wordt duidelijk op welk voorwerp een kracht werkt en dat actie en reactiekracht op *verschillende* voorwerpen werken.

### Constante snelheid



figuur 3a



figuur 3b

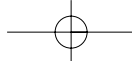
De krachten bij constante snelheid.

Terug naar de 'free-body' diagrammen.

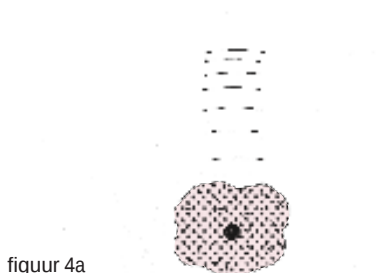
Figuur 3a betreft een steen met een constante snelheid op een oppervlak; dit is wat onrealistisch, maar didactisch nuttig. De meest voorkomende fout is een resultante in de richting van de snelheid. Met zo'n resultante zou de beweging versneld zijn ( $F_{\text{res}} = ma$  en NIET  $mv$ ).

In figuur 3b worden minder fouten gemaakt. Wij schrijven wrijving als  $F_{\text{oppervlak op steen // (wrijving)}}$ . Dat is wat omslachtig maar geeft duidelijk de oorzaak van de kracht aan en contrasteert met  $F_{\text{oppervlak op steen } \perp \text{ (normaal)}}$ . Sommige leerlingen tekenen nog steeds een krachtenpijl in de richting van de beweging. Als je geen ander object kunt vinden als oorzaak van de kracht dan is er geen kracht! Er hoeft geen kracht te zijn in de richting van de snelheid.

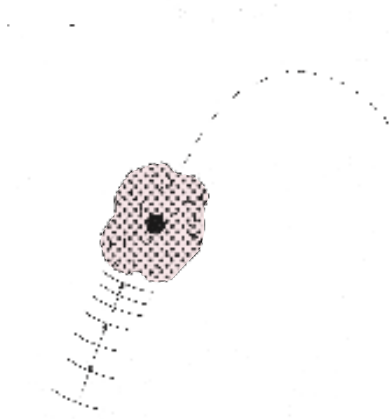
**Conclusie en recept voor leerlingen:** evenals in statische situaties geldt dat bij constante snelheid de resultante kracht nul is (geen versnelling). Als leerlingen al weten dat de snelheid constant is, dan moet de resultante nul zijn. Dit is een van de moeilijkste zaken in de mechanica en moet door oefening en redeneren worden ingeslepen.



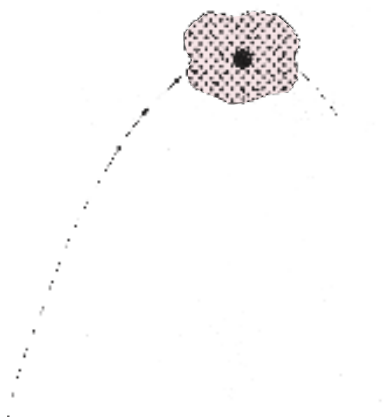
## Versnelde beweging



figuur 4a



figuur 4b



figuur 4c

*De krachten bij versnelde bewegingen.*

In figuur 4a is er wel een pijl in de richting van de beweging. De richting van snelheid en versnelling valt samen. Als men wrijving meeneemt, dan is er ook een pijltje omhoog van luchtwrijving. In figuren 4b en 4c kan men ervoor kiezen *wel* of *geen* wrijving in beschouwing te nemen. Doe het eerst zonder. In beide

gevallen zullen veel leerlingen een pijl tekenen in de richting van de beweging. Maar we kunnen geen voorwerp aangeven dat die kracht uitoefent op de steen, we weten geen oorzaak voor zo'n kracht. Dan is 'ie er niet! Wat leerlingen tekenen is eigenlijk impuls ( $p=mv$ ) en niet kracht. In tegenstelling tot kracht kan impuls wel gezien worden als een eigenschap van een voorwerp.

**Conclusie en recept voor leerlingen:** Bij een versnelde beweging is de resultante van alle krachten op het voorwerp niet nul en wijst in de richting van de versnelling. De richting van de versnelling kan verschillen van de richting van de snelheid!



*Geef duidelijk aan welke kracht op welke heer werkt en label die krachten met de kracht van ... op ...*

Als klap op de vuurpijl teken je nu de krachten op de beide heren in figuur 5 (Arafat links en Rabin rechts). Geef duidelijk aan welke kracht op welke heer werkt en label de krachten van ... op ...

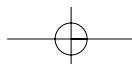
### Didactische aanwijzingen

Docenten hebben de neiging een werkblad te maken waar leerlingen in één keer doorheen gaan en dan achteraf te bespreken. Jammer, dan wordt leerlingen de mogelijkheid van duidelijk zichtbare vooruitgang ontnomen. De feedbackrondes resulteren in correcties die leerlingen vervolgens direct toepassen. Ze kunnen hun eigen prestatie met sprongen vooruit zien gaan en *dat kweekt het hoogst noodzakelijke vertrouwen als basis voor motivatie.*

De oefening moet dus in stukjes worden geknipt en de sprongen moeten klein genoeg zijn. Dus niet alleen de moeilijkste diagrammen doen, waardoor de gemiddelde leerling nooit de ervaring heeft het diagram geheel goed te hebben. Deze lesmethode om met begripsproblemen om te gaan is inmiddels behoorlijk populair op Amerikaanse universiteiten als Harvard, met groepen van 200 studenten en één docent! Er zijn zelfs speciale boekjes met conceptuele vragen in meerkeuzeformat<sup>6,7</sup>. Verschillen in antwoorden leiden tot discussies tussen studenten en *peer teaching*.

### Literatuur

1. Berg, E. van den (2001). Onmiddellijke diagnose en feedback in natuur- en scheikundelessen. *NVOX*, 26(8), 407-410.
2. Berg, E. van den & Huis, C. van (1998). Het tekenen van krachten. *NVOX*, 23(1), 18-19.
3. Court, J.E. (1999a). Free-Body Diagrams Revisited – I. *The Physics Teacher*, 37(7), 427-433.
4. Court, J.E. (1999b). Free-Body Diagrams Revisited – II. *The Physics Teacher*, 37(8), 495.
5. Verhagen, P. (1995). Krachten tekenen. *NVOX*, 20(2), 79-82.
6. Mazur, E. (1997). *Peer Instruction*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
7. Green, P.J. (2003). *Peer Instruction Astronomy*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall/Pearson Education.



## Paper Circuits to *Short-Circuit* Practice in Electric Circuit Making<sup>4</sup>

Ed and Daday van den Berg  
Science and Mathematics Education Institute  
University of San Carlos  
Talamban Campus  
Cebu City, Philippines 6000  
Now: Edberg51@planet.nl

### The key idea

Using paper circuits students can quickly learn how to translate symbolic pictures of circuits into paper circuits which look almost like real circuits. Practice is without risk of damaging meters and many more circuits can be made per unit time by students individually *and* be inspected by the teacher than when working with wires, batteries/power supplies, and bulbs. Students learn quickly how to connect A- and V- meters properly and how to avoid short circuits. After having learned to configure circuits, the students then have the prerequisites for starting to learn about electrical circuit *concepts*.

Our “teaching experience” short-circuited. Many years ago we were teaching electricity in a laboratory course in Indonesia where we usually had to group 4 or more students per set of equipment. We thought we were teaching very well. That’s what many of us always think. The student groups seemed to function well. As teachers we emphasised that all group members should know how to arrange the circuits, how to put in the meters, etc. Sometimes we stopped boys from dominating the Voltmeters and put the girls on to them, to the Voltmeters that is. But then the laboratory exam came and students had to work individually. One after the other the fuses of the unintelligent power supplies were blown. In the panic of quickly changing them during an exam, one of us (Ed) even got a nice 220 V shock. That woke us up.

### The paper circuits

The next lesson each student had to cut some pieces of paper into make-believe resistors, bulbs, A- and V- meters, and batteries or

power supplies. They were given pieces of string to simulate circuit wires/cables. The instructor put a drawing on the blackboard and the 40 students made their paper and string circuits. Each circuit got inspected. If right, inspection took a few seconds only, if wrong the instructor explained/corrected or arranged the services of another student while continuing to inspect circuits of other students. Then the circuit on the board was changed slightly, students again configured their paper circuits. After an hour of working like that, one circuit after another, performance with real circuits improved markedly.

### Paper too trivial?

Later on, when working in the Netherlands, teachers did not seem very interested in this method of training circuit making. Perhaps teachers thought we were silly. We ourselves were not teaching electricity at the time and had no opportunity to try the method. After moving to the Philippines, we tried again. Both undergraduate physics teacher education students and several groups of in-service teachers enthusiastically make their paper circuits. The individual work with paper circuits really helps them prepare for the real circuits and it makes them feel more confident when starting on the real circuits. Students and teachers learn very quickly with this method, they can see their own progress very clearly in half-an-hour of paper circuit making.

### A bridge between symbolic and real circuits

Is this only a training method for developing countries, where equipment is limited and student groups during laboratory work are too big (4 - 10 per group and up)? No. The paper circuits are somewhere in-between abstract and symbolised circuits drawn in books and real circuits with wires and bulbs, etc. They form a bridge between the *symbolic* and the *real* circuits. The paper circuits can be manipulated much faster than the real circuits and they can also be checked much faster by the teacher than the wire mess of real circuits, so students can get *more practice in a shorter time*. Moreover, there are no risks of blown meters or power supplies. In short, we recommend paper circuits for all countries.

Instead of paper circuits one could use computer simulations. Programs like Crocodile Clips™ will give warnings when circuits are faulty. The screen representations of such programs are also in-between the symbolic textbook pictures and the wire mess

---

<sup>4</sup> *School Science Review*, 81(295), December 1999, 126-127.

of real circuits. One could say that electric circuit simulation software constitutes the high end of circuit-making-training tools while the paper circuit constitutes the low end in terms of costs and ease of use. We ourselves prefer the *paper* circuits because there as teachers we can follow the performance of our students more easily than with computers and students can concentrate on the circuits rather than get side-tracked by the details of manipulating the software. We prefer to use computer simulations later in the learning process and with other objectives in mind.

### Practical suggestions

A few students can easily prepare the components to be used in the paper circuits activity. Use some brightly coloured thick paper. We now have over 40 sets of paper circuit components in envelopes ready for use any time. Instructions regarding circuits to make, are most easily given from the blackboard. When inspecting the paper circuits one should watch for: a) the proper placement of meters (Ammeter inside the circuit, V-meter parallel), b) the proper polarity of the meters and batteries, c) possible shorts in student circuits. With regard to meters we always suggest students to make the circuit without meters first. Then *open* the circuit for placing Ammeters. For Voltmeters: add them onto the circuit, usually there is *no* need for opening the circuit for a Voltmeter. Have a try and have fun!

### References

Crocodile Clips™, 11 Randolph Place,  
Edinburgh, Scotland EH3 0GP.

### Example Series of Circuits

**Instructions: The teacher draws the circuit on the board, the students arrange the circuits using the paper components.**

**Circuits are done one by one.**

1. Battery (or other power supply) and light bulb (Figure 1).
2. Battery (or other power supply) and light bulb and Ammeter such that it measures the current on the + side of the bulb.
3. Same as in 2, but now Ammeter measures current on the – side of the bulb.
4. Battery and light bulb and Ammeter, Voltmeter across the bulb.
5. Battery and two light bulbs in parallel and Ammeter at – side of power supply (Photo 1). Ammeter measures total current.
6. Battery and two light bulbs in parallel and Ammeter such that it measures the current in bulb  $L_1$  only. Voltmeter across bulb  $L_1$ .
7. Battery and two light bulbs in parallel and Ammeter such that it measures the current in bulb  $L_2$  only. Voltmeter across bulb  $L_2$  and Ammeter (Photo 2).
8. Two batteries and two light bulbs in series, Ammeter and Voltmeter to measure Voltage across bulb  $L_1$  (Figure 3).
9. Two batteries and two light bulbs in series, Ammeter and Voltmeter such that it measures the Voltage across  $L_2$ .

Photo 1: A power supply, two bulbs in parallel, a Voltmeter, and an Ammeter measuring total current.

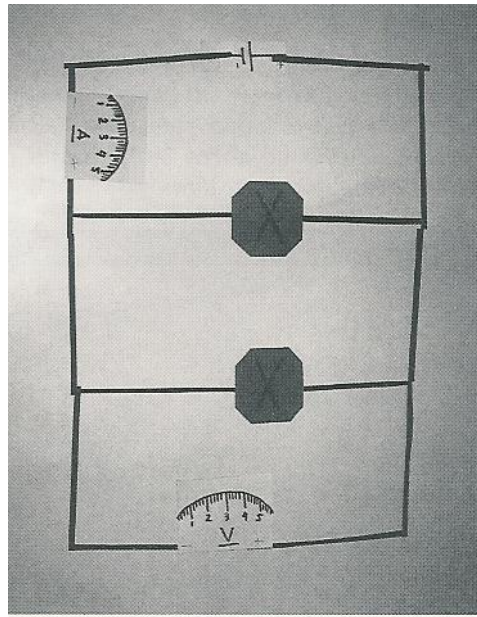
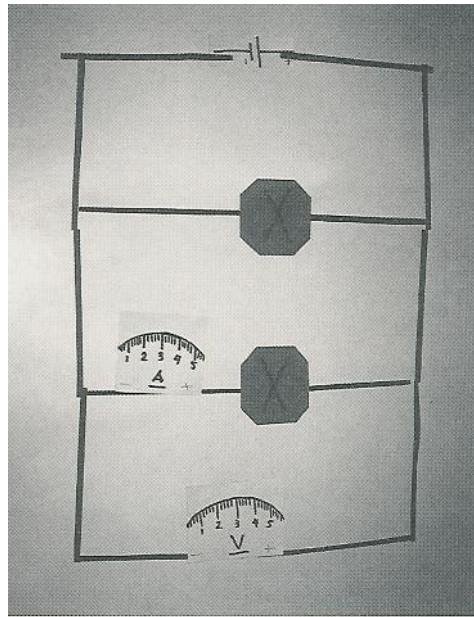


Photo 2: Same as in photo 1, but now the Ammeter measures the current in one branch only.



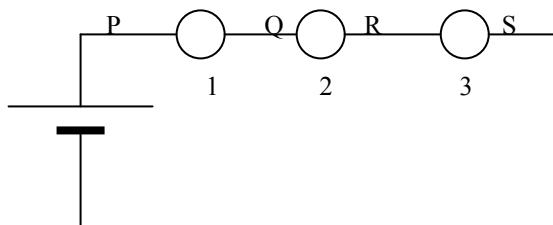
## Examples of Different Fast Feedback Formats for Electric Circuits

The following worksheets are intended as an example of different formats of fast feedback methods in teaching. Students answer a problem in such a way that the instructor can see in one second what the answer of the student is. In ten seconds the instructor can see answers of ten students and thus get an impression of the understanding of the class. The teacher can then react based on whatever misconceptions (s)he has seen. In the current form, the worksheets would be used for a review of circuits after teaching most of a circuit chapter. However, in a different order and inserting some simpler circuits, it can be used for teaching.

### I. BOX FORMAT

#### For questions 1 – 4 answer in Box 1

1. A circuit consists of a battery and three identical light bulbs (Figure 1) in series. Compare the brightness of the bulbs which are indicated by 1, 2, and 3 respectively



2. Compare the magnitude of the currents through bulb 1 ( $I_1$ ), bulb 2 ( $I_2$ ), and bulb 3 ( $I_3$ ) and the current in the battery ( $I_B$ ).
3. Compare the magnitude of the Voltage across bulb 1 ( $V_{PQ}$ ), bulb 2 ( $V_{QR}$ ), and bulb 3 ( $V_{RS}$ ).
4. Suppose bulb 3 is taken out of its fitting so the circuit is open between R and S, what can you say now about the Voltages  $V_{PQ}$ ,  $V_{PR}$ , and  $V_{RS}$ ?

#### Box 1

Use the signs  $>$ ,  $<$ , or  $=$  to indicate your answers.

Brightness (B)

1.  $B_1 \dots B_2 \dots B_3$

Current (I)

2.  $I_1 \dots I_2 \dots I_3 \dots I_B$

Voltage (V)

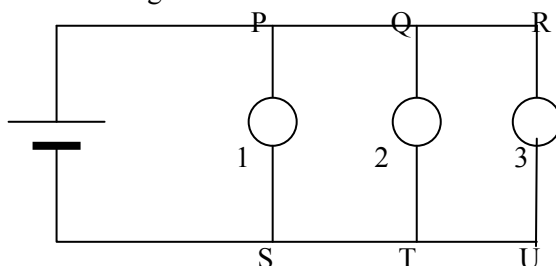
3.  $V_{PQ} \dots V_{QR} \dots V_{RS}$

Voltage after disconnecting bulb 3

4.  $V_{PQ} \dots V_{QR} \dots V_{RS}$

#### For questions 5 – 8 answer in Box 2

5. A circuit consists of a battery with three identical light bulbs in parallel. Compare the brightness of the three light bulbs.



6. Compare the magnitudes of the currents through the three bulbs and the current through the Battery ( $I_B$ ).
7. Compare the magnitude of the Voltages across each bulb.
8. Bulb 3 is taken from its socket so that the circuit is now open between R and U. Compare the voltages.
9. Compare the current through bulb 1 before ( $I_{1, \text{before}}$ ) and after ( $I_{1, \text{after}}$ ) bulb 3 has been removed and compare these currents with zero.

#### Box 2

Use the signs  $>$ ,  $<$ , or  $=$  to indicate your answers.

5.  $B_1 \dots B_2 \dots B_3$

6.  $I_1 \dots I_2 \dots I_3 \dots I_B$

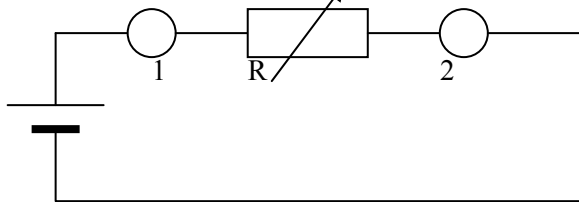
7.  $V_{PS} \dots V_{QT} \dots V_{RU}$

8.  $V_{PS} \dots V_{QT} \dots V_{RU}$

9.  $I_{1, \text{before}} \dots I_{1, \text{after}} \dots 0$

**For questions 10 - 14 answer in Box 3**

10. A variable resistor  $R$  is connected in series with two light bulbs as shown in the figure. Compare the currents in bulb 1 ( $I_1$ ) and bulb 2 ( $I_2$ ).



The variable resistor is *increased*.

11. After the increase, compare the magnitude of the currents through bulbs 1 and 2.  
12. After the increase, compare the brightness of the bulbs 1 and 2

The variable resistor is set to the initial value of question 10 again, and then *decreased*.

13. After the decrease, compare the brightness of bulbs 1 and 2.  
14. After the decrease, compare the magnitude of the currents through bulbs 1 and 2.

**Box 3**

Use the signs  $>$ ,  $<$ , or  $=$  to indicate your answers.

Initial current:

10.  $I_1 \dots I_2$

Current after  $R$  is increased:

11.  $I_1 \dots I_2$

Brightness after  $R$  is increased

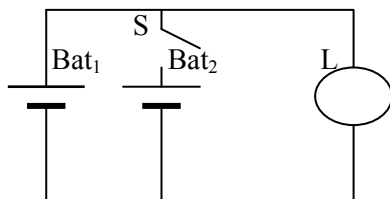
12.  $B_1 \dots B_2$

Brightness after  $R$  is decreased:

13.  $B_1 \dots B_2$

Current after  $R$  is decreased

14.  $I_1 \dots I_2$

**For questions 15 – 19 answer in Box 4**


The circuit consists of two batteries  $Bat_1$  and  $Bat_2$  and a light bulb  $L$  as shown. Initially battery  $Bat_2$  is not connected to the circuit but it can be connected by closing switch  $S$ .

We compare the situation *before* and *after* the switch is closed.

15. Compare the current in  $L$  before and after the switch is closed.  
16. Compare the brightness of the bulb  $L$  before and after the switch is closed.  
17. Is there much or little difference in brightness before and after? Please circle in the box.  
18. Compare the current through battery  $Bat_1$  before and after the switch is closed.  
19. Compare the voltage across the bulb  $L$  before and after the switch is closed.

**Box 4**

Use the signs  $>$ ,  $<$ , or  $=$  to indicate your answers.

Total current

15)  $I_{\text{before}} \dots I_{\text{after}}$

Brightness of  $L$

16)  $B_{\text{before}} \dots B_{\text{after}}$

Difference in brightness:

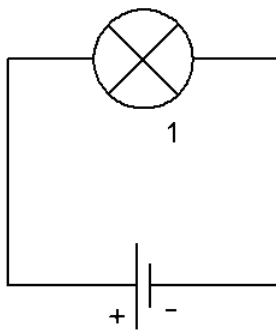
17) much.....little

Current in Battery  $B_1$

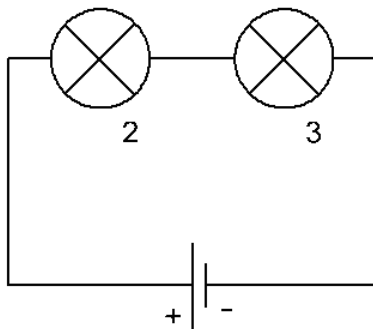
18)  $I_{B1, \text{before}} \dots I_{B1, \text{after}}$

Voltage across  $L$

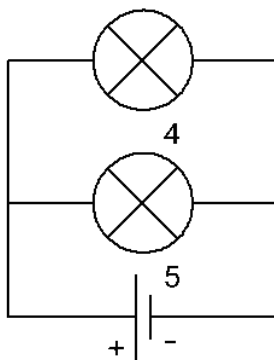
19)  $V_{\text{before}} \dots V_{\text{after}}$



**Circuit A**



**Circuit B**



**Circuit C**

Figure: Three circuits with identical bulbs and identical power sources.

## II. RANKING FORMAT<sup>5</sup>

**For questions 20 – 25 answer with big letters (so the teacher can see quickly) and provide brief explanations which could be in small letters.**

The identical bulbs are called 1, 2, 3, 4, and 5. The power source for each circuit is ideal and supplies the same constant voltage to each circuit, for example assume 10V. **Using the signs >, <, or = to rank the variables from smallest to biggest.**

20. Compare the currents  $I_A$ ,  $I_B$ , and  $I_C$  supplied by the power supply in circuits A, B, and C.

Answer: \_\_\_\_\_

Explanation: \_\_\_\_\_

21. Compare the total resistance  $R_A$ ,  $R_B$ ,  $R_C$  of circuits A, B, and C

Answer: \_\_\_\_\_

Explanation: \_\_\_\_\_

22. Compare the Voltages  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_3$ ,  $V_4$ ,  $V_5$  across each of the bulbs 1, 2, 3, 4, and 5.

Answer: \_\_\_\_\_

Explanation: \_\_\_\_\_

23. Compare the currents  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$ ,  $I_4$ , and  $I_5$  through each of the bulbs

Answer: \_\_\_\_\_

Explanation: \_\_\_\_\_

24. Compare the brightness  $B_1$ ,  $B_2$ ,  $B_3$ ,  $B_4$ , and  $B_5$  of bulbs 1 through 5

Answer: \_\_\_\_\_

Explanation: \_\_\_\_\_

<sup>5</sup> This sheet uses a ranking method. A complete book with ranking exercises in physics, another “fast” format, is: O’Kuma, T. L. et al. (2004). Ranking task exercises in Physics, Prentice Hall, ISBN 0-13-022355-7

25. Compare the actual power consumption  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$ ,  $P_4$ , and  $P_5$  of bulbs 1 through 5

Answer: \_\_\_\_\_

Explanation: \_\_\_\_\_

### III. MULTIPLE CHOICE FORMAT

Please answer questions 26 – 28 by circling the letter of the response (A or B or C)

#### QUESTIONS 17 - 19

We connect a TV and an stereo to a box with outlets (Figure 4). The box is connected to an outlet. We leave both appliances on for one minute. Then we disconnect the tv. Now we only leave the stereo on for one minute.

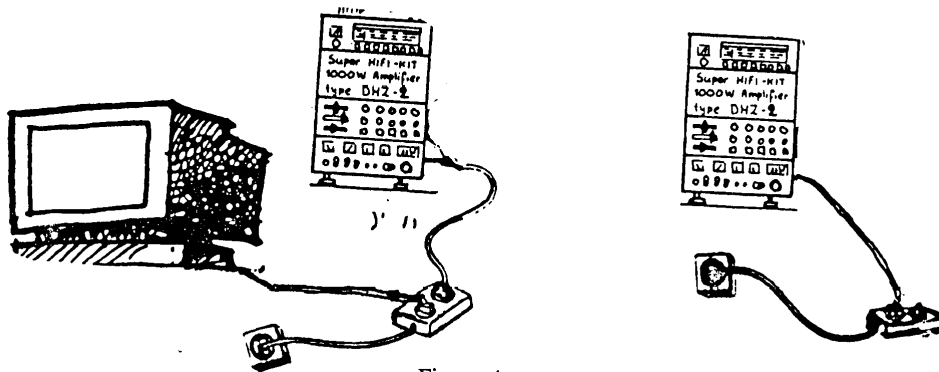


Figure 4

26. The outlet *delivers* to TV and stereo together in one minute:

- A. more energy than the stereo alone
- B. as much energy
- C. less energy

27. TV and stereo together use in one minute:

- A. more energy than the stereo alone
- B. as much energy
- C. less energy

28. Compare the current from the outlet when both the TV and stereo are on with the current when only the stereo is on. The current to TV and stereo together is:

- A. larger than the current to the stereo only.
- B. the same
- C. smaller

During the lab phase you do not have a stereo or TV. Try to design an experiment to test questions 20 – 22 in a comparable situation.

## Diagnostic Test on Light

Ed van den Berg, SMEI, USC, Cebu City, Philippines

NAME : \_\_\_\_\_  
Class : \_\_\_\_\_ School: \_\_\_\_\_

DATE : \_\_\_\_\_

This test is a diagnostic test only, NOT for grading. We would like to know your ideas about light.

1. Consider figure 1. A candle is burning during the day. The light from the candle:
  - A. stays on the candle.
  - B. Comes out about halfway towards you
  - C. Comes out as far as you but no farther
  - D. Comes out until it hits something.

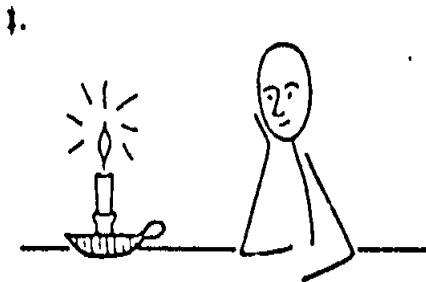


Figure 1: You are watching a candle during the day

2. Now (Figure 2) there is a brown out during the evening and you are using a candle. The light from the candle:
  - A. stays on the candle.
  - B. Comes out about halfway towards you
  - C. Comes out as far as you but no farther
  - D. Comes out until it hits something.

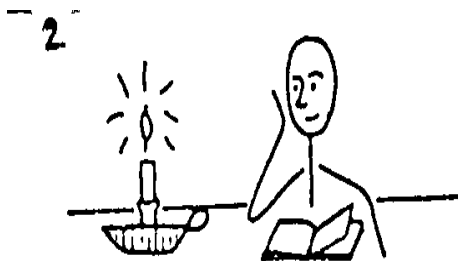


Figure 2: You are watching a candle during the night



Figure 3: You are watching a lamp during the day

3. The light bulb of figure 3 is on during the day. The light from the light bulb:
  - A. stays on the bulb.
  - B. Comes out about halfway towards you
  - C. Comes out as far as you but no farther
  - D. Comes out until it hits something.

4. Now it is evening. The light from the light bulb:
  - A. stays on the bulb.
  - B. Comes out about halfway towards you
  - C. Comes out as far as you but no farther
  - D. Comes out until it hits something.

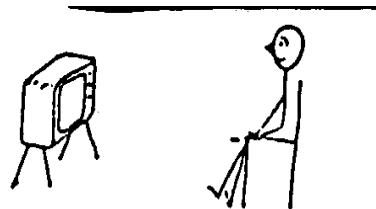


Figure 4: You are watching TV

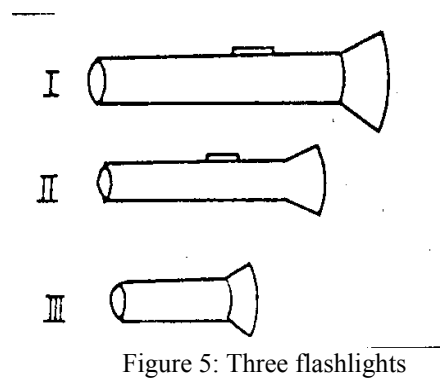
5. You are watching TV during the day (Figure 4). The light from the TV:
  - A. stays on the TV.
  - B. Comes out about halfway towards you
  - C. Comes out as far as you but no farther
  - D. Comes out until it hits something.

6. You are watching TV during the evening. The light from the TV:
  - A. stays on the TV.
  - B. Comes out about halfway towards you
  - C. Comes out as far as you but no farther
  - D. Comes out until it hits something.

7. We compare three light sources: a candle, a 40 Watt light bulb, and the Sun. Which light source emits light with the greatest speed ?
  - A. a candle
  - B. a 40 Watt light bulb
  - C. the sun
  - D. All sources emit light with the same speed.

8. Compared to during the day, the speed of light from a flashlight at night is:
  - A. greater
  - B. smaller
  - C. the same

9. Figure 5 shows three flashlights:



flashlight I has 6 batteries; flashlight II has 4 batteries; flashlight III has 2 batteries. If all three flashlights are switched on, which light travels fastest? The light of:

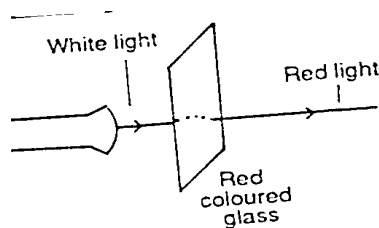
- A. flashlight I
- B. flashlight II
- C. flashlight III
- D. of all flashlights has the same speed.

10. We have three light bulbs each of which is connected to a 220 Volt source. One is a 100 Watt bulb, one is 75 Watt, and one is 25 Watt. Which light will have the greatest speed? The light of:

- A. the 100 Watt bulb
- B. the 75 Watt bulb
- C. the 25 Watt bulb
- D. the light of each bulb has the same speed.

11. A flashlight emits white light. If we hold a piece of red glass in front of the flashlight the white light becomes red (Figure 6). The speed of this red light

Figure 6: Light passing through a red glass



compared to the speed of the original white light is:

- A. greater
- B. smaller
- C. the same

12. As in problem 11 but now the red glass is replaced by a blue glass so that the white light becomes blue instead of red. The speed of blue light compared to the original white light is:

- A. greater
- B. smaller
- C. the same

13. How do the speeds of the red light and the blue light compare?

- A. the speed of the blue light is greater.
- B. the speed of the red light is greater.
- C. the speed depends on the brightness of the light.
- D. the speed is the same.

14. This question is like question 11, but now the red glass is replaced by a piece of window glass (uncolored, transparent) so that the light of the flashlight remains white. The speed of the white light after getting through the glass compared to the speed of the original white light is

- A. larger
- B. smaller
- C. the same

15. A flashlight shines onto a mirror so

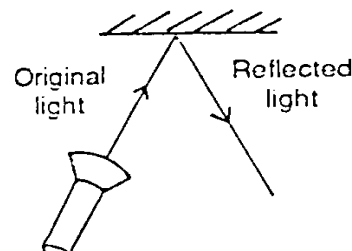


Figure 7: Light reflection from a mirror

that the light is reflected by the mirror (Figure 7). The speed of the reflected light compared to the original light of the flashlight is:

- A. larger
- B. smaller
- C. the same

16. As in question 15 but now the mirror is replaced by a piece of paper and only a small part of the light is reflected. The speed of the reflected light compared to the speed of the original light of the flashlight is:

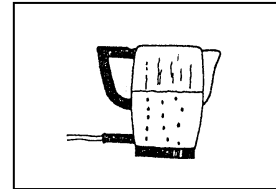
- A. larger
- B. smaller
- C. the same

## Worksheet on Phase Changes and Particulate Nature of Matter<sup>6</sup>

The following worksheet is derived from work by Roger Osborne and Mark Cosgrove in New Zealand. All questions have first been asked in interviews with several dozen students of different ages. Then the diagnostic items were constructed using the most common student answers in student language. **The items are intended for diagnostic assessment only.**

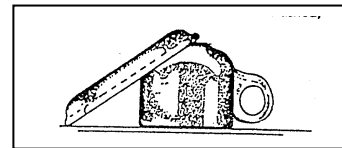
1) When a jug boils, there are large bubbles in the water. What are the bubbles made off?

- a) air
- b) steam
- c) heat
- d) oxygen or hydrogen



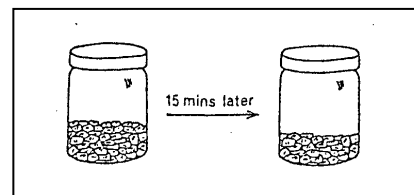
2) When a wet saucer is left on the bench after it has been washed, then after a while it is dry. What happens to the water that doesn't drip onto the bench?

- a) It goes into the saucer.
- b) It dries up and no longer exists as anything.
- c) It changes into oxygen and hydrogen in the air..
- d) It goes into the air as small bits of water.



3) A small jar is filled with ice, the lid is screwed on tightly, and the outside of the glass is dried with a tea towel. Fifteen minutes later the outside of the jar is wet. Where has the water on the outside of the jar come from?

- a) The water from the melted ice comes through the glass.
- b) The coldness causes oxygen and hydrogen in the air to form water.
- c) Water in the air sticks to the cold glass
- d) The coldness comes through the glass and turns to water.



### Experiences

On first sight you will expect that grade 12 students and college students will easily give the best answers. My own experiences have been disappointing. Many good students will still answer that the bubbles when boiling consist of hydrogen and oxygen even though we do not observe any explosions and the thermal energy  $kT$  involved in boiling is way below the several eV per molecule binding energy of  $H_2O$ . So it is well worth to insert these diagnostic questions somewhere into your physics program.

Some examples of answers obtained in interviews by Osborne and Cosgrove and reported in their article in the *Journal of Research in Science Teaching* are the following:

### On Boiling

View 1: The bubbles are made of heat

View 2: The bubbles are made of air

*What are the bubbles?* Air pockets...hot air rises, grabs the air and takes it back to the element. When the water comes up to the surface, it cools and will go down again and might have sort of trapped some air in it...(age 16).

OR The heat of the element could turn some of the water into air...(age 12)

View 3: The bubbles are oxygen or hydrogen

*How do you see what is going on?* Separating I suppose...the hydrogen and the oxygen... (age 15)

View 4: The bubbles consist of steam

<sup>6</sup> For background on student conceptual problems in this area see Osborne/Cosgrove, *Journal of Research in Science Teaching*, 1983, 825-838

*What are they?* Gas escaping. Water turning into steam. Well, the bubbles, when they burst, it's water being turned into steam, and that's why they're escaping. *How did the bubbles form?* Molecules moving around, they're getting faster and faster, and they want to break out because...they're strong enough to break out (age 17)

### On Condensation

View 1: It has all gone sweaty.

It's hot and it's just like you're running and you sweat in that it's hot...and it's just gone on to the plate...you get all hot and sweaty just the same as the plate (age 13)

View 2: The steam makes the plate wet

It's gone wet and warm with the steam...the hot air...the steam...was going around it and it was getting hotter which made it wet...*Where did the water come from?* The steam but I don't know how.

View 3: The steam changes back into water

You reckon that's water...*same as the water in the jug or different water?* Different water. *How is it different?* I don't think we drink this kind of water You would not want to drink this? No. *Anything wrong with the water?* Well, I don't think anybody drinks steam water.

View 4: The hydrogen and oxygen in the steam recombine to form water.

The atoms of oxygen and hydrogen are rising up from the water. *Separately?* Yes, separately, and when they hit something, they sort of joint together and form little drops of water (age 14).

View 5: The steam has cooled and the water molecules have moved closer together

The cold has condensed the steam...the steam has cooled...and the atoms and molecules are closer together.

Well, it's sort of the reverse of what's happening... You don't just get one water molecule on the plate, you get water molecules colliding with the plate at the same time, and when they collide, well they lose energy and become water because ...they have less energy...not moving as fast, and when they do collide then the molecules get the most stable state, they form up with links between each molecule, and you get the water droplet as a result (age 17, very special answer).

## Fast feedback met Ordeningsvraagstukken (Ranking Tasks)<sup>7</sup>

Ed van den Berg  
Ron Vonk  
AMSTEL Instituut

Met ordeningsvraagstukken kun je leerlingen verleiden begripsmatig en semi-kwantitatief te denken en bovendien is het ook een fast format, als docent kun je in een oogopslag zien of leerlingen er wel of niet uitkomen. Ordeningsvraagstukken vereisen meestal geen precieze berekeningen, maar wel goede schattingen. Dat is uiterst nuttig om een gevoel te ontwikkelen voor de orde van grootte van antwoorden.

Een heel simpel en nog niet zo conceptueel probleempje is het volgende:

Orden van *klein* naar *groot*:

- A. een waterstof atoom
- B. een water molecuul
- C. een elektron
- D. een proton
- E. een natrium atoom

Hiermee kun je eenvoudig controleren of leerlingen de orde van grootte redelijk door hebben. De meest wenselijke volgorde van klein naar groot is: C, D, A, E, B en een docent kan dit rijtje letters in een oogopslag herkennen.

Een wat ingewikkelder probleem is het volgende uit : O’Kuma, T. L. et al. - *Ranking Task Exercises in Physics*, 2004 p 161. De tekening van connecties in D en E is onduidelijk, maar neem aan dat de batterijen in D en E parallel staan.

**Batteries and Bulbs—Bulb Brightness<sup>161</sup>**

Identical batteries are connected in different arrangements to the identical light bulbs.  
Rank from brightest to least bright these items on the basis of bulb brightness.

Brightest 1 \_\_\_\_\_ 2 \_\_\_\_\_ 3 \_\_\_\_\_ 4 \_\_\_\_\_ 5 \_\_\_\_\_ Least Bright

Or, all bulbs have the same brightness. \_\_\_\_\_

Please carefully explain your reasoning. \_\_\_\_\_

<sup>7</sup> Dit hoofdstuk is nog in ontwikkeling

Antwoord van felste tot minst fel:  $C > B > A = D = E$  hierbij is aangenomen dat interne weerstand van de batterij verwaarloosd kan worden en dat de draden in D en E correct met + en - verbonden zijn. In de figuur lijkt het bijna alsof zowel + als - van de voorste batterij verbonden zijn met de + van de batterij erachter. Dat zou kortsluiting van de eerste batterij zijn.

Het op volgorde zetten zelf is een snel format, je kunt aan een antwoord zo zien of het goed of fout is. De uitleg die erbij geschreven wordt, is natuurlijk niet snel maar uiterst nuttig als oefening voor leerlingen en zeer informatief als aanvulling van diagnostische informatie voor de docent.

Een voorbeeld voor de onderbouw:

Spanning en stroomverbruik voor een aantal apparaten is gegeven in tabel 1.

Orden de apparaten naar vermogen van kleinste naar grootste.

| Apparaat          | Spanning in Volt (V) | Stroomsterkte in Ampere(A) |
|-------------------|----------------------|----------------------------|
| A. Lamp           | 230                  | 0,1                        |
| B. Laptop oplader | 20                   | 2                          |
| C. Koelkast       | 230                  | 0,5                        |
| D. Calculator     | 3                    | 0,0001                     |

Paul Hewitt heeft in de nieuwste (11<sup>de</sup>) editie van zijn *Conceptual Physics* ook ranking problems opgenomen. Zijn voorbeelden zijn ietsje gemakkelijker dan die van O' Kuma et al, zowel wat begrip betreft als door het gebruik van 3 of 4 in plaats van 6 situaties.

### RANKING

1. The weights of Burl, Paul, and the scaffold produce tensions in the supporting ropes. Rank the tension in the *left* rope, from most to least, in the three situations, A, B, and C.

A                      B                      C

2. Rank the net force on the block from least to most in the four situations, A, B, C, and D.

10 N ← A → 5 N    7 N ← B → 3 N    12 N ← C → 4 N    3 N ← D → 3 N

3. Different materials, A, B, C, and D, rest on a table.

- From greatest to least, rank them by how much they resist being set into motion.
- From greatest to least, rank them by the support (normal) force the table exerts on them.

12 kg sand    10 kg water  
A              B              C              D

4. Three pucks, A, B, and C, are shown sliding across ice at the noted speeds. Air and ice friction forces are negligible.

2 m/s              4 m/s              6 m/s  
A                      B                      C

- Rank them, from greatest to least, by the force needed to keep them moving.
- Rank them, from greatest to least, by the force needed to stop them in the same time interval.

Nog een paar interessante mechanica voorbeelden van Hewitt zijn:

### RANKING

1. Jogging Jake runs along a train flatcar that moves at the velocities shown in positions A–D. From greatest to least, rank the velocity of Jake relative to a stationary observer on the ground. (Call the direction to the right positive.)

2. A track is made of a piece of channel iron bent as shown. A ball released at the left end of the track continues past the various points. Rank the speed of the ball at points A, B, C, and D, from fastest to slowest. (Watch for tie scores.)

3. A ball is released at the left end of these different tracks. The tracks are bent from equal-length pieces of channel iron.

4. Three balls of different masses are thrown straight upward with initial speeds as indicated.

- From fastest to slowest, rank the speed of the ball at the right end of the track.
- From longest to shortest, rank the tracks in terms of the *time* for the ball to reach the end.
- From greatest to least, rank the tracks in terms of the *average speed* of the ball. Or do all balls have the same average speed on all three tracks?

- From fastest to slowest, rank the speeds of the balls 1 s after being thrown.
- From greatest to least, rank the accelerations of the balls 1 s after being thrown. (Or are the accelerations the same?)

Vooral nummers 2 en 3 zijn aardig en daar moet behoorlijk bij worden nagedacht. Onze eigen oplossingen:

2:  $v_C > v_B = v_D > v_A$ , dit bij verwaarlozing van wrijving.

3a:  $v_B > v_C = v_A$ , ook bij verwaarlozing van wrijving.

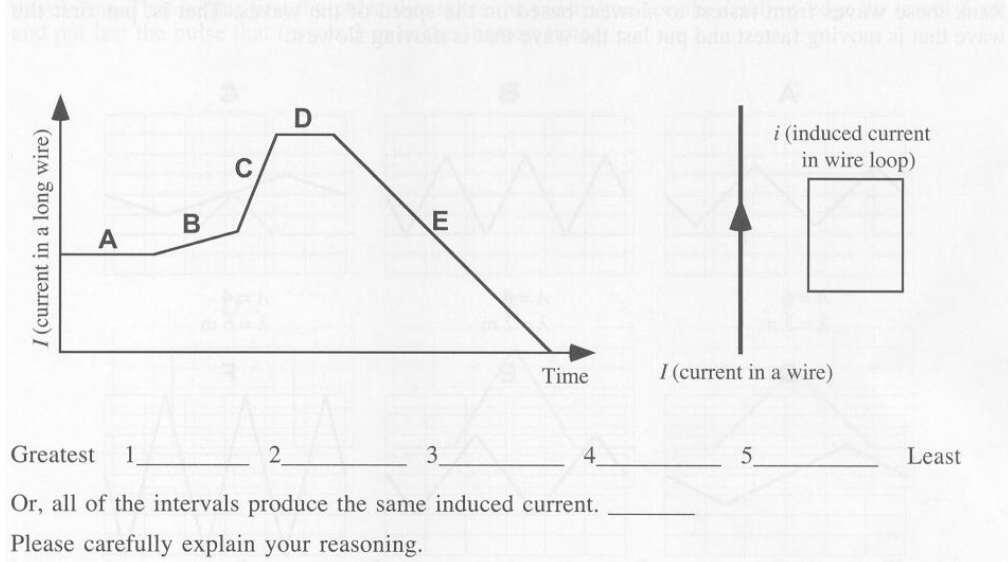
3b:  $t_A > t_B > t_C$  met als redenering dat zowel B als C een stukje hebben met hogere snelheid, maar dat het afstandje dat met hogere snelheid wordt afgelegd in C iets groter is.

3c:  $v_{Cgem} > v_{Bgem} > v_{Agem}$  de afstand is hetzelfde, gemiddelde snelheid is afstand/tijd, de tijd is bij C het kortst en dus is  $v_C$  gemiddeld het grootst.

Het volgende probleem komt weer uit het boekje van O’Kuma et al en gaat over een typisch probleem uit de bovenbouw van havo/vwo.

We have a long wire with a varying current,  $I$ , as indicated in the graph below. Near this wire is a square loop, also shown in the diagram below.

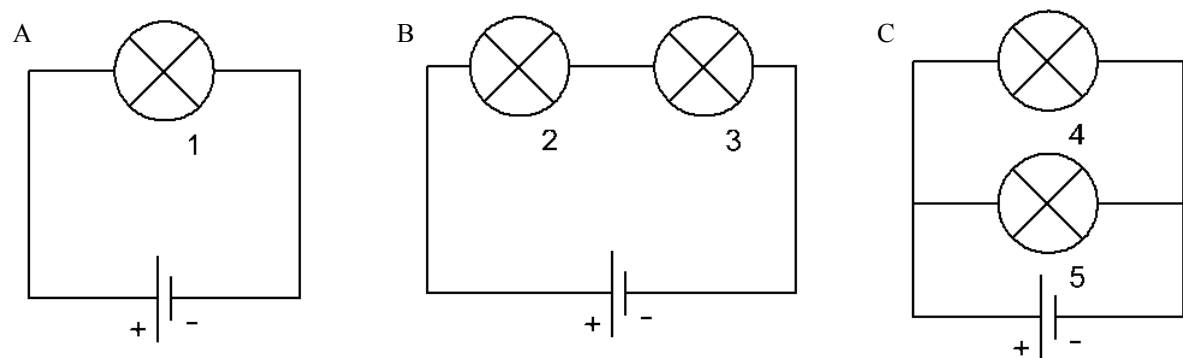
Rank the magnitude of the induced current,  $i$ , in the square loop from greatest to least for the different time intervals.



De inductiestroom in het vierkante raam is er alleen op momenten dat de stroom in de rechte draad **verandert**. Hoe sneller die stroom verandert (steile grafiek), des te groter de inductiestroom in de loop. Dus antwoord van groot naar klein:  $C > E > B > AD$

De meeste voorbeelden in het boekje *Ranking Task Exercises in Physics* zijn geschreven voor eerstejaars cursussen in de universiteit in de VS. Het niveau ligt op de grens van een Nederlands havo/vwo niveau en 1<sup>ste</sup> jaar universiteit. Maar het is gemakkelijk om ordeningstaken te maken op een wat lager niveau.

Voorbeeld: De volgende schakelingen hebben identieke lampjes en een bron met dezelfde spanning (6 Volt). Orden de lampjes 1 t/m 5 op felheid van het licht van klein naar groot. Alle lampjes zijn identiek. Verklaar je antwoorden.



Antwoord (als inwendige weerstand van de batterij verwaarloosd wordt): 23, 145 dus  $I_2 = I_3 < I_1 = I_4 = I_5$

Antwoord (als inwendige weerstand van de batterij niet verwaarloosd wordt): 23, 45, 1 oftewel:  $I_2 = I_3 < I_4 = I_5 < I_1$

Met dezelfde figuren zou je nog andere vragen kunnen stellen. Bijvoorbeeld welke batterij levert de grootste stroom. ( $I_B < I_A < I_C$ ). Een preciezer kwantitatief antwoord is  $I_C = 2I_A = 4I_B$ . Dit is een notoire misconceptie vraag. Leerlingen zijn geneigd te antwoorden dat elke

spanningsbron dezelfde stroom levert onafhankelijk van de schakeling. Uiteraard moet je dan je didactische trukendoos wijd opentrekken om het verschil tussen stroom en spanning goed uit te leggen.

In allerlei natuurkundeonderwerpen kan men soortgelijke vragen stellen. Bijvoorbeeld over eindtemperaturen van mengen van water:

We mengen:

- A. 100 ml water van 30°C met 100 ml water van 60°C
- B. 50 ml water van 30°C met 100 ml water van 60°C
- C. 100 ml water van 30°C met 50 ml water van 60°C
- D. 100 ml water van 30°C met 100 ml water van 70°C

Orden de mengsels volgens hun eind temperatuur van kleinst naar grootst.

Antwoord: C, A, BD oftewel  $T_C < T_A < T_B = T_D$

Let op, in de onderbouw kunnen er nog leerlingen zijn die temperaturen gaan optellen, bv water van 30° en 60° wordt 90°. Daar moet je dan een goede uitleg voor verzinnen.

### Literatuur

Hewitt, P. (2009). Conceptual Physics (11<sup>th</sup> editie). Pearson

O’Kuma, T. L., Maloney D., and Hieggelke C.J. (2000). Ranking Task Exercises in Physics. Addison-Wesley, ISBN-13: 9780131448513

Vonk, R. (2010). Ranking tasks in de natuurkundeles. NVOX, 35(2), 62-63.

Vonk, R. (2010). [www.natuurkunde.nl/artikelen/view.do?supportId=940500](http://www.natuurkunde.nl/artikelen/view.do?supportId=940500)

# Three lessons on conservation laws, symmetries, and elementary particles in grade 12<sup>8</sup>

Ed van den Berg, Dick Hoekzema  
Centre for Science and Mathematics Education  
Utrecht University, P.O. Box 80000, 3508 TA, Utrecht, Netherlands  
e-mail: [edberg51@planet.nl](mailto:edberg51@planet.nl), [d.j.hoekzema@phys.uu.nl](mailto:d.j.hoekzema@phys.uu.nl)

## Abstract and overview

Lessons about elementary particles at the secondary school level can degenerate into listing a zoo of particles and reactions, resulting in disorganized and rather meaningless knowledge. A more powerful way is to focus on conservation laws, symmetries, and reaction diagrams. The conservation laws and symmetries provide generalizing power which enables the students to predict whether or not certain reactions are possible and to derive new reactions from given ones by applying the symmetries. In this article we present a student text on simplified reaction diagrams and three symmetry operations. Then we present three lessons on elementary particles. The first is an introduction to the particles of the standard model with a focus on the first generation. The second and third lesson are about conservation laws and symmetries and these lessons are guided by a worksheet. The fast feedback method is used to increase the efficiency of the learning and teaching process. The method was developed and piloted during the last two school years in Dutch secondary schools.

## Introduction

A number of countries have experimented with including elementary particles in secondary school physics programs (Hanley, 2000). The Institute of Physics developed an interesting module in the early 1990s, which inspired curriculum makers in several other countries (IOP/Open University, 1992). The Netherlands introduced the topic into the national pre-university syllabus in 1991 after a pilot project in the 1980s, but had to retract it when the syllabus turned out to be too overloaded in general, and Feynman diagrams and some other topics turned out to be too ambitious. At present Advancing Physics (2001) in UK has a serious chapter on particle physics. Salters/Horners (2001) includes accelerators and detectors but avoids reactions of elementary particles. Hanley (2000) provides an overview of recent projects and resources for teaching about particles. Popular books like those of Close (1983) and Ne'eman and Kirsh (1996) are very helpful in the preparation of secondary school lessons. Several articles on teaching particle physics appeared in *Physics Education*. Pascolini and Pietroni (2002) described an Italian way of presenting simplified Feynman diagrams in a qualitative way. Allday (1998) and Kalmus (1999) provided useful background articles for teachers. Dunn et al (1998) described the measurement of the mean lifetime of cosmic ray muons with simple means. The Dutch National Institute for Nuclear and High Energy Physics recently organized a network of muon detectors on roofs of schools to track cosmic showers. CERN has stimulated teaching projects through its summer school for teachers<sup>9</sup>. In the Netherlands in a Modern Physics project, which currently runs in 34 schools, we have another attempt to include elementary particles in the curriculum. This time we focus on conservation laws and symmetries. With just a few general principles, students can evaluate whether a given reaction is possible and then derive other possible reactions. Instead of studying a multitude of particles and reactions, students focus on the general principles. The physics aspects of the approach have been described recently (Hoekzema et al, 2005). In this article we focus on presenting a *teaching method*, which has been used successfully in pilot schools for the past two years.

---

<sup>8</sup> Berg, E. van den, Hoekzema, D.J. (2006). Teaching conservation laws, symmetries, and elementary particles with fast feedback. *Physics Education*, **41**, 47-56.

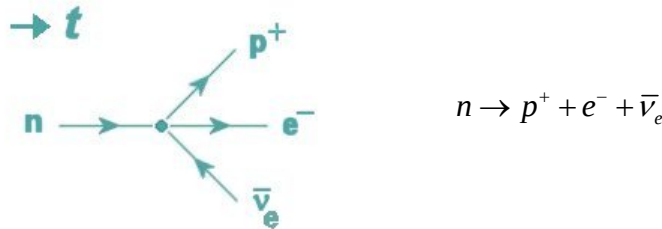
<sup>9</sup> <http://teachers.web.cern.ch/teachers/>

## Reaction Diagrams

The different forms of beta decay can all be derived from the following equation by applying symmetries:

$$n \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}_e \quad (1)$$

We will illustrate this using simplified Feynman diagrams. Figure 1 shows the most familiar form of beta decay. First we will explain the diagram.



**Figure 1.**  $\beta^-$  decay.

In the diagram in figure 1 time is going from left to right. The lines stand for particles; points where the lines come together (called: vertex) visualize interactions; the diagram expresses conservation laws: conservation of baryon number in the case of the proton and neutron, and conservation of lepton number in the case of the electron and the anti-neutrino. Arrows to the right indicate “normal” particles with positive baryon and lepton numbers such as the neutron and proton (baryons) and electron (lepton). Arrows pointing to the left indicate anti-particles such as the anti-neutrino (figure 1) and the positron (figure 3) which both have lepton number  $-1$ . Photons are indicated with wavy lines without arrows, as photons are their own anti-particles. The simplified reaction diagrams are interpreted merely as graphical representations of reaction diagrams. They lack many of the connotations attached to real Feynman diagrams, because these turned out to be too difficult for secondary students. The diagrams are not interpreted as mathematical entities, nor do we go into any subtleties such as time ordering. As a result, the simplified diagrams are learned rather easily, particularly when introduced with the fast feedback method.

## Beta Decay and Symmetries

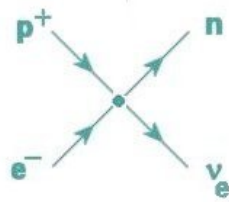
Let's return to the reaction in figure 1. We can apply three major symmetry operations to equation 1.

Time reversal (**T**) states that the reverse reaction is possible in principle, although the probability of the reverse reaction may be small due to the required energy or the likelihood of getting the proper particles at the same place and time. So the arrow in equation 1 can be reversed (equation 2 below).

The second symmetry concerns charge conjugation (**C**) and states that all particles can be replaced by their antiparticle and that this results in a reaction that is possible. A third way of applying symmetry principles is “crossing”. With crossing (**X**) we can take any particle of a possible reaction and replace it by its antiparticle if we move it to the other side of the reaction equation. As an example we first apply time reversal to equation 1:

Time reversal (**T**): 
$$p^+ + e^- + \bar{\nu}_e \rightarrow n \quad (2)$$

Then we apply the crossing operation (**X**) on the antineutrino, replacing it by its antiparticle and moving it to the right side of the equation. We indicate this crossing operation on the antineutrino with  $\mathbf{X}(\bar{\nu})$ .

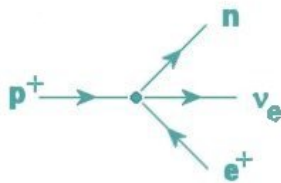


$$\text{Crossing } \bar{X}(\bar{\nu}): p^+ + e^- \rightarrow n + \nu_e \quad (3)$$

**Figure 2.** Electron capture derived from the  $\beta^-$  decay reaction.

In nuclei with a relative shortage of electrons, a proton can convert into a neutron through *electron capture*. This reaction takes place primarily in heavy nuclei. The inner electrons are then close to the nucleus, which increases the chances of electron capture. This is exactly what is pictured in figure 2 and equation 3

In equation 3 we can move the electron to the other side of the arrow –once again applying the crossing operation– and replace it with its anti-particle: the positron. The resulting process of  $\beta^+$  emission is shown in figure 3 and equation 4.



$$\text{Crossing } X(e^-): p^+ \rightarrow n + e^+ + \nu_e \quad (4)$$

**Figure 3.**  $\beta^+$  decay derived from the  $\beta^-$  decay reaction.

This reaction cannot take place in a free proton, as the reaction requires energy. Within a nucleus, such energy might be available if there is a surplus of protons. In the nucleus, neutrons experience only attractive nuclear forces of other neutrons and protons<sup>10</sup>. However, protons experience attractive nuclear forces as well as repulsive electrostatic forces of other protons. If there are too many protons the nucleus becomes unstable due to the electrostatic potential energy. Some of the electrostatic potential energy is used to create mass when a proton decays into a neutron and a positron plus a neutrino (figure 3). The last two will be ejected from the nucleus. The reaction is called  $\beta^+$  decay. On the other hand the decay of a neutron into a proton plus an electron and anti-neutrino is called  $\beta^-$  decay.

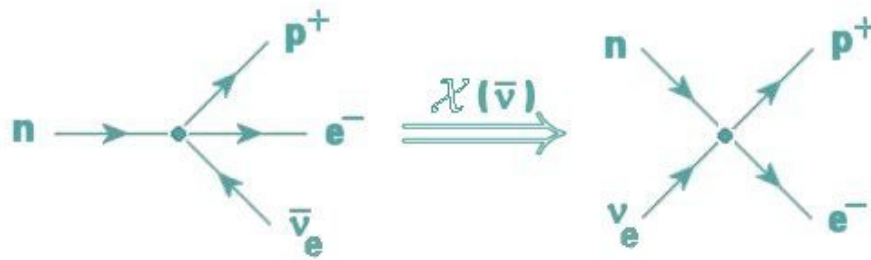
Summarizing:  $\beta^-$  decay occurs in nuclei with a surplus of neutrons. In the nucleus a neutron is converted into a proton. In nuclei with a surplus of protons, the reverse reaction can occur in which a proton is converted into a neutron. This result can be achieved through two different reactions. The first of these reactions is called *electron-capture*: a proton can capture an electron, resulting in a neutron and a neutrino (figure 2). The second is  $\beta^+$  decay (figure 3).

By applying the crossing operation we can still obtain another reaction as shown on the right in figure 4. A neutron and a neutrino can combine to produce a proton plus an electron. This reaction does indeed occur and can be used to detect neutrinos. Nobel laureate Davis used a reaction of a neutrino with a chlorine nucleus, which then converts to argon to detect and count neutrinos emitted by the Sun:



Please note that crossing symmetry can be applied in the diagrams by mirroring an arrow: the anti-neutrino arrow in figure 4 (left) is mirrored versus a vertical axis through the vertex and results in the neutrino arrow on the right of figure 4.

<sup>10</sup> At extremely short distance, nuclear forces are repulsive to prevent collapse of the nucleus.



**Figure 4.** Neutrino capture derived from the  $\beta^-$  decay reaction.

By crossing the electron in the left part of figure 4 and then applying time reversal, we can get:

$$p^+ + \bar{\nu} \rightarrow n + e^+ \quad (6)$$

Equation 6 shows a way to detect anti-neutrinos, and indeed, the reaction is possible if the anti-neutrino is sufficiently energetic to produce the extra mass of neutron and positron.

### Fast feedback method

Now we get to the pedagogy of how to teach about these symmetries and conservation laws. First we introduce the fast feedback method. Fast feedback is a “whole class” teaching method in which the teacher gives a series of short tasks to be done by students individually but at a collective pace. The tasks can be answered in the form of a diagram, a sketch, a drawing or a few words. After giving a task the teacher goes around and looks at student work. Here and there (s)he asks students to clarify their answer. In one or two minutes the teacher can check a representative sample of 10 – 20 students. Then (s)he goes to the front and in plenary addresses one or two major problems with the task and then presents the next task. The teacher has to keep pace to keep the lesson moving. Not every single student error is discussed in plenary, only one or two of the most common errors before the class moves to the next task. If we count 2 or 3 minutes for each task and 2 minutes for plenary discussion, then in a 20-minute portion of a lesson the teacher can go through 4 or 5 tasks.

With this method the teacher gets immediate feedback on whether students understand and what kind of misunderstandings there are. The students get immediate feedback, as the teacher can respond individually or in plenary to the common errors and misunderstandings (s)he observed. Fast feedback methods are a common element in so-called interactive engagement teaching methods (Hake, 1998; Meltzer & Manivannan, 2002). For example, the peer teaching method described by Mazur (1997) and Crouch & Mazur (2001) uses concept-focused multiple-choice questions. A quick vote on answers provides a good indication of prevalent student misconceptions. Subsequent small group discussion of answers triggers student engagement and provides more feedback for students and teachers. Berg (2003) outlined different formats for fast feedback in the classroom, and Berg et al (2000) contains a worked out example for kinematics. The remainder of this article provides an example for elementary particles.

### Three lessons

In our Modern Physics project we spend ten 50-minute lessons on nuclear reactions and elementary particles. Only lessons 5, 6 and 7 are relevant here AND COULD STAND ALONE AS A THREE LESSON SEQUENCE ON ELEMENTARY PARTICLES. Lessons 1 - 4 are on recalling chemical reaction equations, extending the idea to nuclear reactions, energy and mass, binding energy, computations with mass deficits, and accelerators. Lesson 5 introduces the particles of the standard model (Tables 1 & 2). The exercises in lessons 6 and 7 are limited mainly to first generation particles except for the muon.

**Lesson 5:** The teacher introduces the standard model. This may include an historical overview of the discovery of some particles. There are many interesting stories to tell. On the internet one can find PowerPoint presentations that others have used for this.

**Lesson 6:** In a short class discussion the teacher and students recall the conservation laws they have encountered so far (linear momentum, energy-mass, charge, and possibly angular momentum). Then the lesson proceeds in the following steps:

1. The *teacher* starts with the reaction equation:  $p^+ + e^- \rightarrow H$  and gives an example of **C** symmetry by replacing particles with anti-particles:  $p^- + e^+ \rightarrow \bar{H}$ . The resulting anti-hydrogen was made at CERN, Geneva. So this reaction with anti-particles is indeed possible.
2. Then *students* answer exercises 1a and 1b from the worksheet (below) and perhaps an additional exercise added by the teacher. The teacher walks around and identifies any problems students may have with the exercise.
3. The *teacher* discusses the answers to 1a and 1b and perhaps one or two problems in understanding (s)he encountered when looking at the answers of students. Then the teacher gives an example of time symmetry using the ionization of hydrogen.  $H \rightarrow p^+ + e^-$ . Reversing the arrow (time symmetry) also shows a possible reaction.
4. *Students* do exercise 1c and the teacher goes around and looks at answers.
5. The *teacher* discusses the answer to exercise 1c or skips that part altogether if everyone got it right. Then the teacher gives an example of the crossing operation. For example:  $n + \nu_e \rightarrow p^+ + e^-$ . It turns out that we can move particles to the right or left of the arrow if we replace them by their antiparticles. The reaction  $n \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}_e$  is possible, but we are now dealing with an anti-neutrino. Whenever we apply the crossing operation to a valid and possible reaction, the particle has to be replaced by its anti-particle and we have another valid and possible reaction.
6. *Students* do exercises 1d and 1e and the teacher goes around to observe.
7. The *teacher* discusses 1d and 1e.
8. In the same way the class proceeds with exercises 2a-f.

#### Lesson 7:

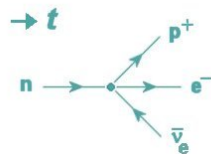


Figure 5.  $\beta^-$  decay.

9. Lesson 7 starts with an example of reaction diagrams (Figure 5).  
On the left of the vertex are reactants and on the right are products. An arrow to the right stands for a particle and an arrow to the left stands for an anti-particle. For further details of these simplified Feynman diagrams we refer to our earlier article (Hoekzema et al, 2005).  
Then exercises 3a-g are done with fast feedback, just like problems 1a-e and 2a-f in the previous lesson.  
After every 1 or 2 exercises, the teacher interrupts, discusses the answers, and the class moves on to the following exercise.
10. Exercises 4 – 6 are done by students individually or in small groups at their own pace and no longer in fast feedback format, as these exercises take more thinking time. Thanks to the format of the worksheet, it is still possible for the teacher to very quickly assess the work of individual students and interact to find out the students' reasons for alternative answers and to engage in individual or small group discussions.

#### Comments (please read the worksheets first)

What students learn is the following: Given a reaction between certain particles, they can derive other possible reactions, and they do that by applying the conservation laws. Some might object that students just learn some tricks. We think that learning to apply conservation laws and symmetries to reactions is valuable and that understanding of symmetries at a much deeper level is not attainable at the secondary level and has to be postponed to university science programs.

## Werkblad 4.3: Behoudswetten, Symmetrieën en Reactiediagrammen<sup>11</sup>

### 1. *Betaverval*



| Vraag 1                                                                       | Antwoord 1 |
|-------------------------------------------------------------------------------|------------|
| i. Controleer baryon, lepton, en ladingsbehoud in reactie (1)                 | a)         |
| i. Pas <b>C</b> -symmetrie toe op (1) en schrijf de resulterende vergelijking | b)         |
| i. Pas <b>T</b> -symmetrie toe op (1) en schrijf de resulterende vergelijking | c)         |
| v. Pas <b>X</b> ( $\bar{\nu}_e$ )-symmetrie toe op (1)                        | d)         |
| v. Pas <b>X</b> ( $e^-$ )-symmetrie toe op (1)                                |            |

### 2. *Reacties met pionen*



| Vraag 2                                                                                                                                                                         | Antwoord 2 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| a) Controleer voor baryon en ladingsbehoud in reactie (2)                                                                                                                       | a)         |
| b) Pas <b>C</b> -symmetrie toe op (2), waarbij $\pi^+$ als antideeltje van $\pi^-$ genomen wordt en $\pi^0$ als antideeltje van zichzelf.                                       | b)         |
| c) Pas <b>T</b> -symmetrie toe op (2)                                                                                                                                           | c)         |
| d) Pas <b>X</b> (n) toe op (2)                                                                                                                                                  | d)         |
| e) Waarom is de laatste reactie tamelijk onwaarschijnlijk?                                                                                                                      | e)         |
| f) Het $\pi^0$ deeltje bestaat uit een up quark en zijn antideeltje ( $u\bar{u}$ ) of een down quark en zijn antideeltje ( $d\bar{d}$ ). Zal het deeltje lang bestaan? Leg uit. | f)         |

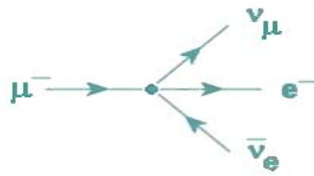
### 3. *Muonverval*

De reactie voor muonverval is:



Het reactiediagram kan als volgt getekend worden (docent legt uit):

<sup>11</sup> Zie eind van werkblad voor deeltjes tabellen.



| Vraag 3                            | Antwoord 3 |
|------------------------------------|------------|
| a) Controleer leptonbehoud in (3)  | a)         |
| b) Pas $C$ symmetrie toe op (3)    | b)         |
| c) Pas $X(\nu_\mu)$ toe op (3)     | c)         |
| d) Pas $X(\bar{\nu}_e)$ toe op (3) | d)         |
| e) Teken het reactiediagram van 3b | e)         |
| f) Teken het reactiediagram van 3c | f)         |
| g) Teken het reactiediagram van 3d | g)         |

#### 4. Nogmaals beta verval

We gaan nu weer terug naar het betaverval:

$$n \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}_e \quad (4)$$

| Vraag 4                                                                                                                                                                                                                                                                    | Antwoord 4 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| a. Gebruik symmetrieën om een vergelijking af te leiden voor beta verval die o.a. resulteert in de emissie van een positron en een neutrino.                                                                                                                               | a)         |
| b. Laat zien dat het niet mogelijk is om met symmetrieën uit (4) een reactie af te leiden waarin uit een neutron o.a. een positron geproduceerd wordt.                                                                                                                     | b)         |
| c. Gebruik de symmetrieën en probeer een reactievergelijking af te leiden waarin een elektron dichtbij de kern wordt ingevangen. (Dit kan in de natuur spontaan gebeuren bij een kern met hoge $Z$ . Niet spontaan kan het ook bij beschieting van kernen met elektronen). | c)         |
|                                                                                                                                                                                                                                                                            | d)         |

|                                                                                                                                                                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| d. Bekijk de vergelijkingen nog eens. Met welk proces zouden we elektron neutrino's kunnen detecteren? Met welk proces elektron antineutrino's                                                                  | e) |
| e. Reactie (4) kan plaatsvinden in een "los" neutron, maar meestal gebeurt de reactie juist in een neutron dat deel uit maakt van een kern, bv ${}^{37}_{17}\text{Cl}$ . Schrijf reactie (1) op voor Chloor-37. | f) |
| f. Door kruising van de reactie in chloor 37, krijgen we een reactie die het mogelijk maakt neutrino's te ontdekken wanneer die botsen met een chloor kern. Schrijf die reactie op en voeg een diagram toe.     |    |

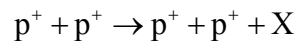
### 5. *Botsingsprocessen*

Voor de volgende reactie vergelijkingen ga na of de betreffende reactie mogelijk is of niet en geef aan waarom.

| Vraag 5                                          | Antwoord 5 |
|--------------------------------------------------|------------|
| a) $\pi^+ + p^+ \rightarrow p^+ + p^+ + \bar{n}$ | a)         |
| b) $p^+ + p^+ \rightarrow p^+ + p^+ + n$         | b)         |

### 6. *Wat voor deeltjes?*

Een reactie is als volgt:



X is een onbekend deeltje.

| Vraag 6                                                                                  | Antwoord 6 |
|------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| a) Is het een meson of een baryon? Waarom?                                               | a)         |
| b) Heeft X lading of niet? Waarom?                                                       | b)         |
| c) Kan X een lepton zijn?                                                                | c)         |
| d) Beantwoord a), b), en c) voor het geval dat er twee deeltjes (X en Y) gevormd worden. | d)         |

**Tabel 1: Elementaire deeltjes**

| Elementaire Deeltjes: Fermionen |                         |                             |            |                          |                                  |                             |            |
|---------------------------------|-------------------------|-----------------------------|------------|--------------------------|----------------------------------|-----------------------------|------------|
| Quarks                          |                         |                             |            | Leptonen                 |                                  |                             |            |
| Generatie                       | Deeltje/smaak           | Massa (GeV/c <sup>2</sup> ) | Lading (e) | Generatie                | Deeltje/smaak                    | Massa (GeV/c <sup>2</sup> ) | Lading (e) |
| 1                               | u up quark              | 0,003                       | 2/3        | 1                        | ν <sub>e</sub> elektron neutrino | <1x 10 <sup>-5</sup>        | 0          |
|                                 | d down quark            | 0,006                       | -1/3       |                          | e <sup>-</sup> elektron          | 0,000511                    | -1         |
| 2                               | c charm quark           | 1,3                         | 2/3        | 2                        | ν <sub>μ</sub> muon neutrino     | <0,0002                     | 0          |
|                                 | s strange quark         | 0,1                         | -1/3       |                          | μ <sup>-</sup> muon              | 0,106                       | -1         |
| 3                               | t top quark             | 175                         | 2/3        | 3                        | ν <sub>τ</sub> tau neutrino      | <0,02                       | 0          |
|                                 | b bottom quark          | 4,3                         | -1/3       |                          | τ <sup>-</sup> tau               | 1,7771                      | -1         |
| Elementaire Deeltjes: Bosonen   |                         |                             |            |                          |                                  |                             |            |
| Sterke interactie               |                         |                             |            | Elektrozwakke interactie |                                  |                             |            |
|                                 | g gluon                 | 0                           | 0          |                          | γ photon                         | 0                           | 0          |
|                                 |                         |                             |            |                          | W <sup>-</sup> W-min-boson       | 80,4                        | -1         |
| Gravitatie                      |                         |                             |            |                          | W <sup>+</sup> W-plus-boson      | 80,4                        | +1         |
|                                 | graviton (hypothetisch) |                             |            |                          | Z <sup>0</sup> Z boson           | 91,2                        | 0          |

- Ieder deeltje heeft een antideeltje, met dezelfde massa en met tegengestelde lading, en tegengesteld baryon- of leptongetal.
- Alle genoemde quarks hebben baryongetal 1/3 en leptongetal 0
- Alle genoemde leptonen hebben baryongetal 0 en leptongetal 1
- Leptonbehoud geldt apart voor elektron/neutrino, muon/neutrino, en tau/neutrino<sup>12</sup>

**Tabel 2: Enkele samengestelde deeltjes**

| deeltje                | samenstelling           | baryongetal | leptongetal |
|------------------------|-------------------------|-------------|-------------|
| $p^+$ proton           | uud                     | 1           | 0           |
| $p^-$ anti-proton      | $\bar{u}\bar{u}\bar{d}$ | -1          | 0           |
| n neutron              | udd                     | 1           | 0           |
| $\bar{n}$ anti-neutron | $\bar{u}\bar{d}\bar{d}$ | -1          | 0           |
| $\pi^-$ pi-min-meson   | $\bar{u}d$              | 0           | 0           |
| $\pi^+$ pi-plus-meson  | $u\bar{d}$              | 0           | 0           |
| $\pi^0$ pi-nul-meson   | $u\bar{u} / d\bar{d}$   | 0           | 0           |
| H waterstofatoom       | $p^+e^-$                | 1           | 1           |

<sup>12</sup> Voor de specialist: we hebben het nog niet over mixing.