

## 4.2 Domeinspecifieke leerstofopbouw

### 4.2.4 Elektriciteit en magnetisme

#### Lesmateriaal

## Rollenspel: Schakelingen

*Ed van den Berg*

### Inleiding

Het volgende rollenspel werd ontwikkeld naar aanleiding van een interview met een 5-vwo leerling die een paar jaar eerder in de onderbouw een rollenspel over schakelingen had gedaan. De herinnering was zo sterk dat hij daaruit zijn ideeën over stroom, spanning, en weerstand opnieuw construeerde.

Het spel kan in de onder- en bovenbouw vmbo, havo en vwo gebruikt worden voor het visualiseren van verschillen tussen de begrippen spanning, stroomsterkte, weerstand, energie, vermogen en serie en parallel, eventueel met stukjes spel in verschillende lessen. Het kan ook gebruikt worden als begripsoefening nadat de begrippen in een reeks lessen geïntroduceerd zijn. De eenvoudige schakelingen zullen nog genoeg problemen opleveren.

### Benodigheden

Leerlingen, koekjes en labels voor elektron, batterij en lamp. Het is handig ook stroom- en spanningsmeters, snoeren, batterijen en lampjes bij de hand te hebben.

### Klassikale opdrachten

Een ‘batterij-leerling’ speelt de batterij en deelt koekjes, pepernoten of crackers (energie) uit aan drie of vier leerlingen die elektronen spelen. De ‘elektron-leerlingen’ geven de koekjes af aan een ‘lamp-leerling’ die lamp speelt. De leraar laat duidelijk de rol zien van batterij (energiebron), elektronen (transporteren energie) en lamp (zet energie om). De leraar benadrukt het behoud van elektronen (ze komen allemaal weer terug in de batterij), gelijke stroomsterkte overall in de schakeling, en gelijke spanning over batterij en lamp. Dat kan tijdens het rollenspel ook gedemonstreerd worden met een eenvoudige schakeling van batterij, lamp, stroommeters voor en na de lamp, en spanningsmeters over de batterij en over de lamp.

Ga snel door enkele variaties. Stel dat we 1,5 V gelijkstellen aan een koekje per elektron. Hoe zit het dan als we twee batterijen van 1,5 V in serie gebruiken? Zie hieronder bij schakeling 2. Wat als we twee lampjes in serie gebruiken? Zie hieronder bij schakeling 3.

Als zo’n plenair rollenspel leuk gaat, dan denk je: “Ze snappen het”. Maar leerlingen hebben oefening nodig. Dat kan door het rollenspel in groepjes voort te zetten. Oefening kan natuurlijk ook door vragen en opgaven, maar dan krijg je minder conceptuele discussie.

### Groepsopdrachten

Groepjes van vijf of zes leerlingen krijgen de taak enkele situaties te spelen. De eerste situaties zijn voor alle groepen gelijk. Een laatste probleem kan per groep verschillend zijn en kan – als er tijd is – aan elkaar gedemonstreerd worden, mits het rollenspel serieus is uitgevoerd.

**Het model** – Elektronen gaan de schakeling rond. Ze ontvangen energie in de batterij, vervoeren het naar de lamp, dragen de energie daar over, en de lamp geeft licht en warmte. De elektronen vervolgen hun weg, komen terug in de batterij, laden nieuwe energie, en gaan weer de schakeling rond. Als de batterij een spanning van 1,5 V heeft, dan krijgt elk elektron 1,5 eV energie als het door de batterij gaat. Als er meerdere lampjes of andere componenten in serie staan, dan verdeelt het elektron de energie over die verschillende componenten evenredig met de weerstand. Dit is echter een te simpel model, waarin een aantal zaken niet klopt:

- Zodra de schakeling wordt aangesloten, wordt een elektrisch veld opgezet

rond de snoeren. Alle geleidingslektronen in batterij en snoeren en apparaat starten tegelijkertijd zodra de schakelaar is omgezet, en ze hebben dan ook al direct hun 'koekje' energie van het elektrisch veld en hoeven niet te wachten tot ze de batterij passeren.

- Het elektron is niet energieloos na passage door een apparaat, maar wel is het zo dat per passage 1,5 eV of 220 eV energie wordt overgedragen, afhankelijk van de bronspanning.
- Alle leerling-elektronen verschillen van elkaar. Echte elektronen zijn identiek. Ook de aantallen kloppen niet: het is lastig  $10^{18}$  leerlingen per seconde door een stroommeter te laten gaan!
- In de analogie mist het ladingsconcept en daardoor ook het voortstuwingsmechanisme van spanning. Je zou eventueel nog kunnen toevoegen dat de energie een soort van buitenboordmotor is voor het elektron... dubbele energie, dan ook dubbele snelheid. Dus bij 3 V tweemaal zo snel als bij 1,5 V.

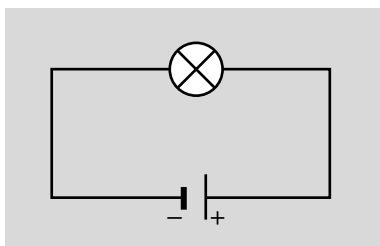
Voor een kritiek op deze analogie, zie het artikel *Understanding Electricity and Circuits: What the Text Books Don't Tell You* (Sefton, 2002).

Het sterke punt van de koekjes-analogie is dat leerlingen het verschil leren tussen energie en stroom en dat ze moeten nadenken over de relatie tussen spanning over componenten en verdeling van energie. De stroom is behouden. De energie wordt omgezet van chemisch naar elektrisch naar licht, warmte of andere vormen. Alle elektronen keren terug naar de batterij. De energie wordt gedistribueerd en omgezet.

### Schakeling 1: Een lamp met een batterij

De eenvoudigste schakeling bestaat uit een batterij en een lamp. Leerlingen starten bij de batterij en verlaten die elk met een koekje dat ze overdragen aan de lamp. Wat we willen laten zien is:

- Er is een stroom van elektronen, alle elektronen blijven behouden en keren terug naar de batterij (behoud van elektronen ofwel lading).
- De stroomsterkte, het aantal elektronen dat per seconde langskomt, is overal in de schakeling gelijk (stroombehoud).
- De stroom vervoert energie en die energie wordt omgezet in de lamp. De energie per elektron is constant en wordt bepaald door de spanning van de batterij of spanningsbron.
- Elektronen gaan van – naar + (verwarrend).



Figuur 1 – Stroomkring van een batterij en een lampje.

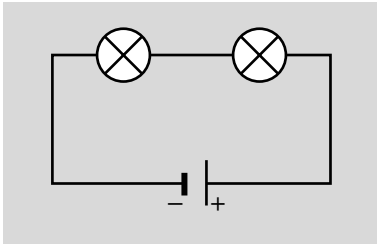
Na dit rollenspel volgt een demonstratie dat  $I_{in} = I_{uit}$  in een echte schakeling met een spanningsbron, twee stroommeters en een lampje. Een handige aanvulling is een PhET simulatie (PhET.colorado.edu).

### Schakeling 2: Een lamp in serie met twee batterijen

De situatie is er nu een van dubbele spanning, en elk leerling-elektron krijgt twee koekjes in plaats van één koekje. De energie per elektron die verzameld wordt bij de twee batterijen is de som van de spanningen van beide batterijen in serie. Bij de lamp worden twee koekjes overhandigd en gegeten. Wat we willen laten zien is:

- Twee batterijen in serie geven dubbele spanning, dus dubbele energie per elektron. Dus: grotere spanning, dan meer energie per elektron.
- De lamp krijgt twee koekjes per elektron en zal dus meer energie per seconde omzetten.
- We stellen het effect van spanning op stroomsterkte nog even uit.

De lamp geeft dus meer licht. In het begin ligt onze aandacht bij de koekjes en hun distributie. De leraar kan nog even wachten met het andere effect, namelijk dat verdubbeling van spanning ook leidt tot verdubbeling van de stroomsterkte. Per elektron is er nu tweemaal zoveel energie, ze gaan dubbel zo snel en dus verdubbelt ook het aantal elektronen dat langskomt. Bij verdubbeling van de spanning krijgt de lamp dus viermaal zoveel energie! Maar zoals gezegd, de leraar kan dit stroomverdubbelingseffect nog even uitstellen. Na dit rollenspel kan een snelle demonstratie volgen met een echte lamp, verdubbelde spanning en



Figuur 2 – Serieschakeling van twee lampjes.

een spanningsmeter.

### Schakeling 3: Twee gelijke lampen in serie met een batterij

Er is één batterij, dus de leerling-elektronen krijgen elk één koekje. Dat koekje moet verdeeld worden tussen twee lampjes. De lampjes zijn identiek, dus elk krijgt de helft. De spanning van de batterij is 1,5 V, dus de spanning over elk van de lampjes zal 0,75 V zijn. De stroomsterkte zal ook afnemen. Focus eerst op spanning en koekjes per elektron en de verdeling daarvan over de lampjes. Behandel vervolgens het effect van verdubbelde weerstand op stroomsterkte, waardoor het aantal elektronen per seconde halveert. In schakeling 3 leren we:

- Als er meer lampjes of weerstanden zijn in serie, dan worden de koekjes verdeeld. Bij gelijke lampjes krijgt elk de helft van de elektronenergie. Waarom? De spanning verdeelt zich en de spanning bepaalt hoeveel energie wordt afgegeven door het elektron. Dus 0,75 eV bij lampje 1 en 0,75 eV bij lampje 2.

Eventueel in een demonstratie na afloop van het rollenspel even de spanning over elk lampje nameten.

### Schakeling 4: Twee ongelijke lampen in serie met een batterij

Er is één batterij, dus elk leerling-elektron krijgt één koekje. Dat koekje moet verdeeld worden tussen twee lampjes. We meten (of schatten) de spanning over elk van de lampjes. De lamp met de hogere spanning krijgt een groter deel van het koekje (de energie) dan de lamp met de kleinere spanning. Stel dat de spanning over het eerste lampje 1,0 V is, en over het tweede lampje 0,5 V. Dan krijgt het eerste twee-derde van het koekje. Wat leren we?

- Energie wordt verdeeld over seriegeschakelde componenten evenredig met de spanning over die componenten (en die blijkt evenredig te zijn met de weerstand).
- De som van de spanningen over de seriegeschakelde componenten is gelijk aan de spanning van de spanningsbron (de koekjes gaan op!).

Maak zo nodig wat variaties op de schakelingen 2 en 3 voor oefening. Daarna schakelen we over van koekjes (spanning en energie) naar stroomsterkte.

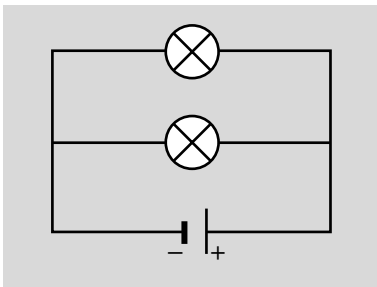
### Stroomsterkte

Eerst terug naar schakeling 3 met twee gelijke lampen in serie met een batterij. Het aantal elektronen dat per tijdseenheid de batterij verlaat is nu kleiner. Dat is moeilijk voor de leerlingen, want velen verwachten dat de stroomsterkte constant is en onafhankelijk van de schakeling (de misconceptie van een *constante stroom*). De manier om dit begrijpelijk te maken is een analogie met verkeer. Bij twee lampen of weerstanden in serie heb je twee smalle bruggen achter elkaar en wordt het verkeer dus extra gehinderd (extra weerstand). Met deze twee obstakels wordt de verkeersstroom kleiner en gaan er dus minder elektronen per tijdseenheid voorbij. De stroom halveert. Elk elektron krijgt nog steeds hetzelfde koekje (energie) van de batterij, maar het aantal elektronen per seconde halveert. Bovendien moet het koekje tussen twee gelijke lampjes verdeeld worden. Elk lampje krijgt een half koekje per passage en de elektronenstroom halveert... dus krijgt elk lampje per tijdseenheid maar een-vierde van de energie vergeleken met het lampje in schakeling 1. Wat we leren is:

- Grotere weerstand, dan kleinere stroom. Nog steeds dezelfde spanning en dus dezelfde hoeveelheid energie per elektron, maar er zijn nu minder elektronen per seconde.

Dan terug naar schakeling 2: een lamp met twee batterijen in serie. De grotere spanning van de twee batterijen samen zorgt niet alleen voor twee koekjes per leerling-elektron, maar zal ook de stroom verdubbelen. Als elk elektron twee koekjes heeft en als het aantal elektronen per tijdseenheid verdubbelt, dan krijgt het lampje viermaal zoveel energie als in schakeling 1 ( $P = U \cdot I$ ). Dubbele spanning leidt tot een viervoudig vermogen. De les:

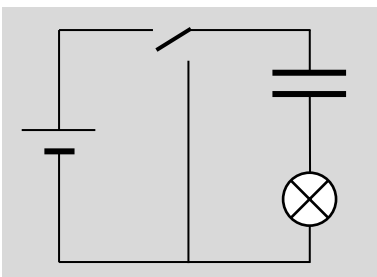
- Grotere spanning, dus meer energie per elektron.
- Grotere spanning, dan grotere stroomsterkte. En dus ook meer elektronen per seconde.



Figuur 3 – Parallelschakeling van twee lampjes.

### Condensator op- en ontladen

Het koekjesmodel is ook uit te proberen op het opladen en ontladen van een condensator. Dat leidt tot een harde confrontatie met de grenzen van het model, maar vooral tot een nuttige discussie over wat er nu precies met spanning, stroom en energie gebeurt bij dat op- en ontladen. De condensator zit niet (meer) in de examenprogramma's, maar voor studenten aan de lerarenopleiding en voor leraren mag dat geen bezwaar zijn. De oefening leidt tot veel conceptuele discussie, veel oefening van de hersens, veel heen en weer denken tussen het nu te simpele koekjesmodel en echte elektronen. Dat alles leidt tot een dieper begrip van het elektronenmodel en wat exponentiële tijdrelaties in stroom en spanning in dit geval betekenen.



Figuur 4 – Op- en ontladen van een condensator.

### Schakeling 5: Twee gelijke lampen in parallel met een batterij

Als twee lampjes parallel staan, staat over elk lampje de batterijspanning. Dus elk elektron dat passeert geeft een compleet koekje af, niet een half. Als beide lampjes identiek zijn, dan verdeelt de stroom zich. Een elektron naar lamp 1, een elektron naar lamp 2 enzovoort. Maar, in analogie met het verkeer: er zijn nu twee parallelwegen, elk met een nauwe brug (lampje), de verkeersstroom verdubbelt. Dit is weer moeilijk voor leerlingen. Ze denken dat stroom alleen bepaald wordt door de bron, maar stroomsterkte is afhankelijk van zowel de bron ( $U$ ) als de schakeling ( $R$ ). Dus:

- Parallel: stroom verdeelt zich... elektronen verdelen zich.
- De stroom in de tak wordt bepaald door de spanning over de tak en de weerstand van de tak. Dat geeft in elke tak dezelfde situatie als schakeling 1, dus dezelfde stroomsterkte.
- De totale stroom verdubbelt, dus elk lampje heeft dezelfde helderheid als in schakeling 1.

### Wisselstroom

Er zit nog wat rek in het koekjesmodel. Bij wisselstroom gaan elektronen nu eens de ene en dan weer de andere kant op. Je kunt dit spelen door bij allebei de polen van de spanningsbron koekjes uit te delen. Nog echter is het om de koekjes uit de lucht te laten vallen. Elektronen nemen energie op uit het elektrische veld en betalen met koekjesenergie om een weerstand, apparaat of lamp te passeren. Maar het model is nu wel erg ver opgerekt. Want geeft elk elektron bij wisselstroom dezelfde energie af? Nee, want de spanning wisselt niet alleen van teken, maar ook de amplitude verandert in de loop van de tijd. En zo loopt het model tegen zijn grenzen aan, maar elk natuurkundig model en zeker elk natuurkunde-didactisch model heeft zijn grenzen!

### Condensator op- en ontladen

Eerst een demonstratie met het opladen en ontladen van een condensator ( $C = 1000 \mu\text{F}$ ) in serie met een lampje. Bij het aanschakelen van de batterij gaat het lampje even aan, wordt snel minder fel, en gaat uit. Bij het kortsluiten van de condensator-lampje schakeling gaat het lampje ook even aan. Verder wordt er niets uitgelegd. Studenten moeten het verschijnsel uitleggen en dan de uitleg vertalen naar een rollenspel. Dit is een moeilijk probleem dat leidt tot veel discussie. Terwijl de condensator geladen wordt, gaat er stroom door het lampje en het gaat aan. Naarmate de condensator volloopt, wordt de stroom kleiner en staat er ook meer spanning over de condensator en dus minder over het lampje: minder elektronen en kleinere koekjes voor de lamp. Bij het ontladen gebeurt iets soortgelijks. Als het ontladen start, is de spanning over het lampje het grootst, evenals de stroomsterkte. Naarmate de condensator leegloopt, worden spanning (koekjesgrootte) en stroomsterkte (aantal student-elektronen per tijdseenheid) kleiner.

Belangrijk: elektronen kunnen de condensator niet passeren. Wel is er voor elke aankomst van een elektron bij de negatieve kant van de condensator een vertrekkend elektron aan de positieve kant van de condensator (opladen) en omgekeerd bij ontladen.

Gedurende het ontladen hebben elektronen ook energie. Waar komt die energie vandaan? Een kort antwoord kan zijn: "Van het veld". En daar kun je het bij laten. Een langer alternatief is om de verschillende energieomzettingen in de schakeling te analyseren, de opbouw van het elektrostatisch veld met zijn potentiële energie, enzovoort.

### Literatuur

- Loughran, J., A. Berry & P. Mulhall (2006). *Understanding and Developing Science Teachers' Pedagogical Content Knowledge*. Rotterdam: Sense Publishers.
- Sefton, I.M. (2002). *Understanding Electricity and Circuits: What the Text Books Don't Tell You*. [Science Teachers Workshop](#).
- Van den Berg, E. & W. Grosheide (1997). Learning and teaching about energy, power, current, and voltage. *School Science Review* 78(284), 89-94.