

5.4 Elektriciteit en magnetisme

Achtergrondinformatie

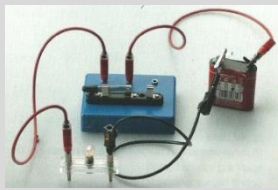
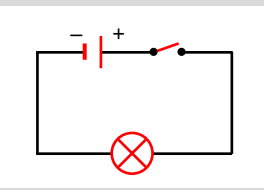
Denkbeelden en analogieën bij elektrische schakelingen

Inleiding

Het is bekend dat in de onderbouw leerlingen sterke eigen denkbeelden hebben over de verschijnselen en wetmatigheden bij elektrische schakelingen. Leraren willen aansluiten bij deze denkbeelden om ze uit te bouwen tot fysisch juiste begrippen en regels (zie hoofdstuk 3 in het handboek). Dat spoort met de principes van *adaptief* onderwijs. In dit artikel gaan we na welke denkbeelden leerlingen hebben over elektrische schakelingen, welke overgangen in het denken gemaakt moeten worden, en in hoeverre analogieën daarbij kunnen helpen.

Kringregel

Bij techniek in het eerste leerjaar wordt meestal aandacht besteed aan elektrische schakelingen. Voorbeelden zijn een schemerlamp en een zaklamp, in figuur 1 weergegeven in de vorm van een drieluik (zie paragraaf 3.1 in het handboek).

Praktijksituatie	Laboratoriumsituatie	Theoriesituatie
		
Je kunt de lamp aan- en uitzetten met de snoerschakelaar.	Voor een werkende schakeling zijn nodig: een spanningsbron, lampje, snoeren en een schakelaar.	Voor een werkende schakeling is een stroomkring nodig. De schakelaar kan die stroomkring sluiten en onderbreken.

Figuur 1 – Drieluik: de schemerlamp. Het drieluik voor de zaklamp ziet er vergelijkbaar uit.

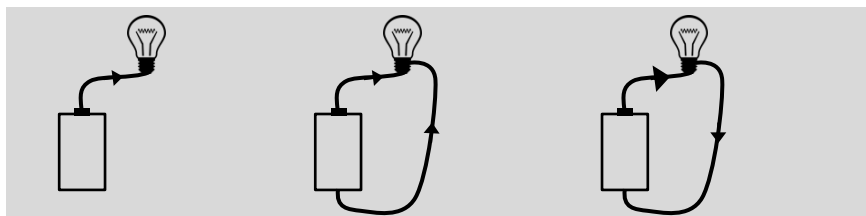
Vakregel – De vakregel die hier van toepassing is heet de *kringregel*. Een lamp kan alleen branden, een motor gaat alleen draaien en een elektrische kachel kan alleen warmte afgeven als ze zijn opgenomen in een gesloten stroomkring met een goed werkende spanningsbron. Met deze vakregel kun je begrijpen dat het frame van de fiets ook een deel van de stroomkring is, dat er bij een spanningszoeker toch echt ook sprake is van een stroomkring, dat een schakelaar de stroomkring onderbreekt, dat je bij een fietslamp die het niet doet kunt kijken of het draadje misschien los geraakt is, en dat de zoemer bij een bibberspel lawaai maakt omdat je door de aanraking een stroomkring sluit.

Realiseer je dat de drie kolommen in figuur 1 van links naar rechts een steeds schematischer voorstelling geven: een stroomkring zoals je die tegenkomt in de praktijk, een enkelvoudige schakeling zoals je die ziet op het practicum en een schakelschema uit de theorie. Er worden steeds meer specifieke details weggelaten en de weergave wordt steeds algemener en komt los te staan van de praktijkcontext. Dit heet *decontextualiseren*. Voor leerlingen is het belangrijk dat ze de overeenkomsten in de drie weergaven van de werkelijkheid aan elkaar kunnen koppelen. In plaats van een lamp kan in de kring ook een elektromotor,

een elektrische kachel of een elektrisch apparaat worden opgenomen.

Leerlingen hebben vaak andere denkbeelden over een stroomkring, zoals weergegeven in figuur 2:

- Voor een brandend lampje is één draad van de batterij naar het lampje voldoende.
- Er zijn twee stromen die botsen bij het lampje.
- De stroom vóór het lampje is groter dan na het lampje (stroomverbruik).



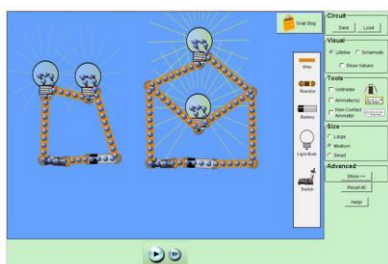
Figuur 2 – Leerlingdenkbeelden over de stroomkring.

Analogie – Het idee van een stroomkring kan versterkt worden door met bierviltjes een stroomkring te simuleren. Stel leerlingen op in een kring. Elke leerling heeft een bierviltje en mag nooit in het bezit zijn van meerdere bierviltjes. Er is een tafel met een stapeltje bierviltjes die de batterij voorstelt. Het is handig om als leraar zelf voor batterij te spelen. De leraar geeft de bierviltjes zo snel mogelijk aan de eerste leerlingen van de kring, die geven de bierviltjes aan elkaar door, en de laatste leerling van de kring legt de bierviltjes terug op de tafel.

Maak een leerling tot schakelaar. Openen van de schakelaar gebeurt door het bierviltje omhoog te houden en te roepen “Ik sta open”. De stroom bierviltjes in de kring stopt onmiddellijk en overall. Voor stroom moet er een kring zijn.

Maak twee leerlingen tot lampje. Zij laten het bierviltje langzaam in een grote boog boven hun hoofd langs gaan en zeggen ondertussen “Ik brand”. De stroomsterkte voor en na het lampje is gelijk. Er is een groot verschil in stroomsterkte bij gebruik van één lampje of bij gebruik van twee lampjes parallel.

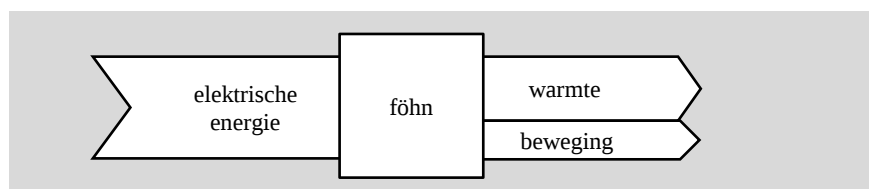
Computersimulatie – Op de website <http://phet.colorado.edu/en/simulations> vind je verschillende simulaties, waaronder die van de stroomkring. Deze maken de stroom goed voor te stellen.



Figuur 3 – Computersimulatie van een stroomkring.

Energieregel

In het tweede leerjaar komt energie aan de orde. Met elektrische energie kun je allerlei *taken* verrichten, zoals verwarmen, verlichten en bewegen. Dit noem je *energie gebruiken* voor een taak. Daarvoor heb je elektrische apparaten of lampen nodig, bijvoorbeeld een kachel, strijkijzer, lamp, ventilator of motor. Deze apparaten of lampen verbruiken elektrische energie en zetten dit om in andere *energiesoorten*.

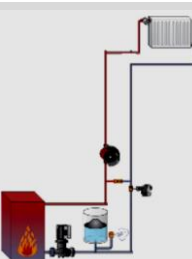
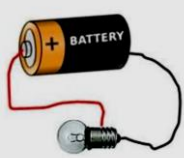


Figuur 4 – Schematische voorstelling van een energieomzetting: het energiestroomdiagram.

Vakregel – De vakregel die hier van toepassing is heet de *energieregel*: de spanningsbron levert elektrische energie aan de stroom, de stroom brengt de elektrische energie naar de lamp of het apparaat, de lamp of het apparaat verbruikt de elektrische energie en zet het om in een andere energiesoort, en de stroom gaat terug naar de spanningsbron.

Leerlingen hebben vaak andere denkbeelden over stroom en energie, zoals stroomverbruik in plaats van energieverbruik.

Analogie – De *centrale verwarming* is een goed bruikbare analogie voor energietransport in een elektrische schakeling. De pomp houdt het water in beweging, de brander geeft warmte mee aan het stromende water, dit warme water stroomt naar de radiatoren, de radiatoren geven de warmte af aan de kamer, en het afgekoelde water stroomt terug naar de brander. Uit deze analogie leren we dat vóór en na de radiator de stroom even groot is, maar dat het water na de radiator afgekoeld is doordat de warmte is afgegeven.

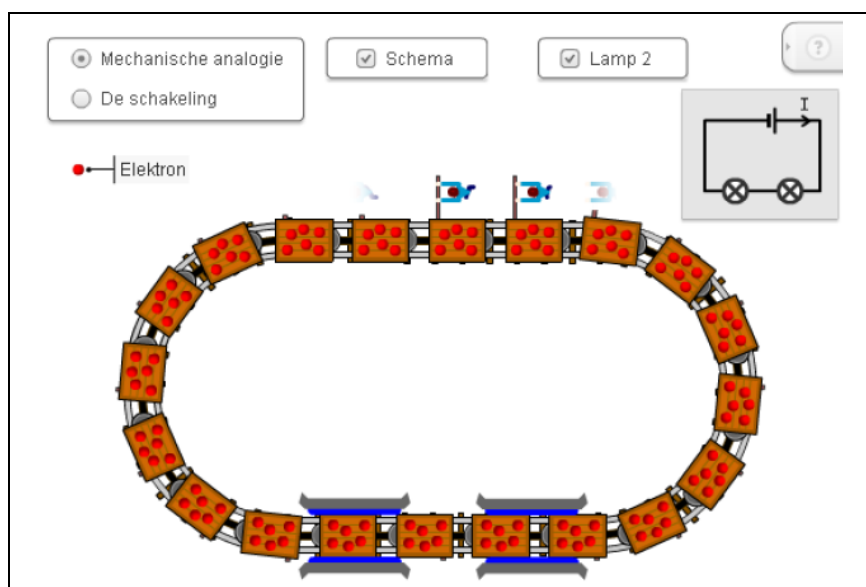
Centrale verwarming	Elektrische stroomkring
	
Ketel, brander en pomp	Batterij, stopcontact, voedingskastje
Leidingen	Snoeren
Stromend water	Elektrische stroom
Warmte	Elektrische energie
Kraan	Schakelaar
Radiator	Lamp, motor, apparaat

Figuur 5 – Een vergelijking tussen de centrale verwarming en de elektrische stroomkring.

Een andere veelgebruikte analogie is die van met volle en lege rugzakken rondlopende mannetjes. Hiervoor worden ook wel treintjes of vrachtwagens gebruikt.

Sommige leerboeken maken een duidelijk onderscheid tussen *gebruik* en *verbruik* van energie, andere gebruiken alleen energiegebruik of alleen energieverbruik. Het woord *energieverbruik* betekent het verbruik van energiesoorten zoals elektrische energie of chemische energie door een lamp of apparaat. De energiehoeveelheid blijft behouden. Het woord *energiegebruik* betekent het gebruik van energie voor taken zoals verwarmen, bewegen of verlichten. Dan wordt het doel aangegeven.

Computersimulatie – In de computersimulatie van figuur 6 duwen de mannen de karretjes voort en geven energie mee aan de karretjes. Door wrijving wordt de beweging van de karretjes tegengewerkt en ontstaat er warmte.



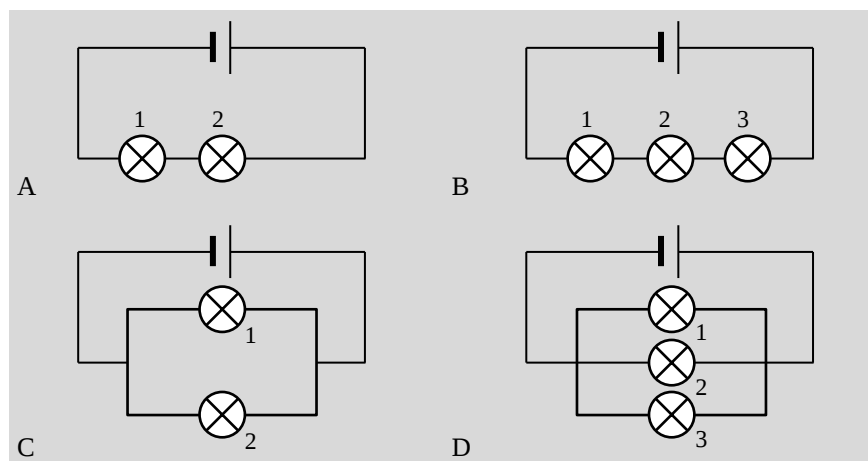
Figuur 6 – Een computersimulatie met een mechanische analogie. Bron: Edumedia <http://www.edumedia-sciences.com/nl/> > elektrisch netwerk > mechanische analogie.

Stroomregel

In het tweede leerjaar wordt veelal onderscheid gemaakt in serie- en parallelschakelingen. Deze worden door de leerlingen bestudeerd vanuit het begrip

stroom. De felheid waarmee een lampje brandt is een prima indicator voor de stroom door het lampje. Als hetzelfde lampje feller brandt, gaat er meer stroom door. Realiseer je dat verschillende lampjes kunnen branden met verschillende felheid, ook al is de stroomsterkte gelijk. De stroom door de lampjes is te meten met een ampère- of stroommeter in serie met het lampje. (De eenheid ampère is ca. $6,3 \cdot 10^{18}$ elektronen per seconde.)

Een instapprobleem om leerlingdenkbeelden te inventariseren is weergegeven in figuur 7.



Figuur 7 – Instapprobleem bij serie- en parallelschakeling, met als opdrachten: a) vergelijk de felheid waarmee de lampjes branden met een lampje dat brandt met gewone lichtsterkte, en b) bedenk wat er gebeurt als je een lampje losdraait.

Leerlingen hebben moeite met het goed voorspellen van de felheid waarmee de lampjes branden. Ze kunnen het effect van serie of parallel nog niet inschatten. Leerlingen voorspellen bij C en D vaak anders bij het losdraaien van een lampje. Ze denken dan dat de overblijvende lampjes feller gaan branden. Hun intuïtieve idee is dat de spanningsbron een constante stroom geeft. Ze maken geen onderscheid tussen een spanningsbron en een stroombron.

Vakregel – Bij het redeneren in met het instapprobleem vergelijkbare situaties helpen de volgende regels:

- In een serieschakeling is de stroom overal gelijk. Meer lampjes op dezelfde spanningsbron geeft een kleinere stroom.
- In een parallelschakeling zijn de lampjes direct aangesloten op de spanningsbron. Ze krijgen dan dezelfde stroom als een lampje dat als enige op de spanningsbron is aangesloten.
- In een parallelschakeling is de hoofdstroom gelijk aan de som van de deelstromen. Meer lampjes op dezelfde spanningsbron geeft dezelfde stroom in elk van de lampjes en meer stroom in de hoofdtak.

Hier kan het begrip *weerstand* geïntroduceerd worden. De stroom wordt meer tegengewerkt door twee lampjes in serie dan door één lampje, en door één lampje weer meer dan door twee lampjes parallel.

Het gebruik van kerstverlichting als voorbeeld van een serieschakeling is tegenwoordig problematisch. Als in een moderne kerstverlichting een lampje stuk gaat, smelt de verbinding aan elkaar en blijven alle overige lampjes branden. Ook de feestverlichting in de straat is verwarrend. Het lijkt een enkel snoer met lampen in serie, maar het is een parallelschakeling met lampen die alle op 230 V werken.

Analogie – De simulatie met bierviltjes kan ook gebruikt worden voor een serie- en parallelschakeling. Een lampje wordt voorgesteld door een leerling die het bierviltje met een langzame beweging boven het hoofd doorgeeft. De stroom bij twee lampjes parallel is dan groter dan bij één lampje, en de stroom bij één lampje groter dan bij twee lampjes in serie.

Een stroomkring met een of twee weerstanden kan ook gesimuleerd worden in de gymzaal. Een omgekeerde bank die gebruikt kan worden als evenwichts-

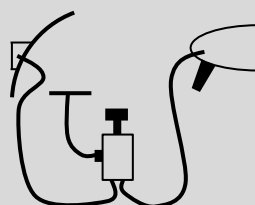
balk stelt een weerstand voor. Op een bank mogen maximaal twee leerlingen lopen. Dus een nieuwe leerling stapt op de bank als een andere leerling halverwege is en de derde leerling net van de bank gaat. Het groepje met twee banken (weerstanden) parallel is veel eerder klaar dan het groepje met één bank (weerstand) en die weer eerder dan het groepje met twee banken (weerstanden) in serie.

De twee situaties van figuur 8 geven een aardige maar moeilijke verwerking van de leerstof.

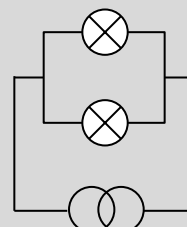
Situatie A

Een handige leerling fietst 's avonds in het donker naar een schoolfeest. De verlichting is uitstekend in orde vanwege de veiligheid, maar meer nog omdat de politie zal controleren. Plotseling begeeft het voorlicht het.

Wat gebeurt er met het achterlicht, en kun je dat uitleggen?



Dynamo met voorlicht en achterlicht parallel

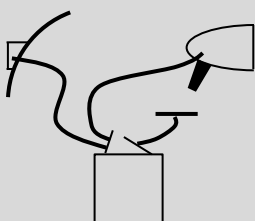


Schakelschema van een stroombron met twee lampjes parallel

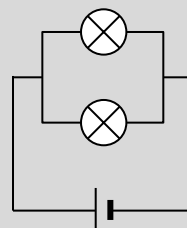
Situatie B

Een andere leerling is zijn dynamo verloren, nadat deze al een tijd los aan de voorvork had gehangen. Maar met een batterij van 4,5 V en na wat knutselwerk branden het voor- en achterlicht. Plotseling begeeft nu ook bij deze leerling het voorlicht het.

Wat gebeurt er met het achterlicht, en kun je dat uitleggen?



Batterij met voorlicht en achterlicht parallel



Schakelschema van een spanningsbron met twee lampjes parallel

Figuur 8 – Twee situaties voor verwerking van de leerstof over serie- en parallelschakeling.

De oplossing voor dit probleem vind je door onderscheid te maken tussen een spanningsbron en een stroombron.

Tot slot het verschil tussen stroomsterkte of debiet en stroomsnelheid. In het dagelijks taalgebruik staat stroomsterkte voor een snelle waterstroom. Maar hier staat stroomsterkte voor debiet.

Hoe sterk is de stroom?

Debiet – De hoeveelheid vloeistof die per seconde een bepaald punt passeert (eenheid liter/s, m³/uur), te meten met een watermeter.

Stroomsnelheid – De snelheid waarmee het water zich langs een stroomlijn voortbeweegt (eenheid m/s), te meten met een snelheidsmeter.

Stroomsterkte – De hoeveelheid elektronen die per seconde een bepaald punt passeert (eenheid A, ampère), te meten met een stroom- of ampèremeter.

Aanbeveling: Maak bij stroomsterkte onderscheid tussen debiet en stroomsnelheid.

Spanning en stroom

Meestal wordt in het derde leerjaar het begrip *spanning* geïntroduceerd. Er zijn allerlei soorten batterijen die zich onderscheiden naar vorm, levensduur en spanning. Spanning wordt in eerste instantie gezien als een eigenschap van de batterij. Meer batterijen in serie laten een lampje feller branden. Meer batterijen parallel verhogen de *levensduur* van de batterij. De stroomsterkte door het lampje zie je aan de felheid waarmee het lampje brandt en meet je met een stroommeter. De spanning van een batterij zie je aan de vorm van de batterij (en

het staat er op) en meet je met een spanningsmeter. De batterij mag je vervangen door een voedingskastje. Dat heeft een instelbare spanning, en is in gebruik goedkoper en milieuvriendelijker.

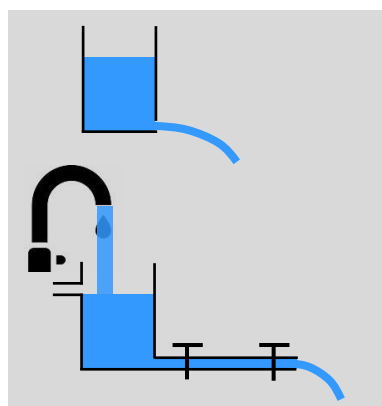
Analogie – Dat de stroom toeneemt bij een grotere spanning laat zich goed voorstellen met water in leidingen. Zet je meer druk op het water, dan gaat het water sneller stromen en neemt het debiet toe. Ook de invloed van de schakeling op de stroom kun je goed voorstellen met water in leidingen. Als de leidingen dunner zijn, neemt de *weerstand* toe en zal bij dezelfde druk minder water door de leidingen stromen.

Om een beeld te krijgen van spanning is het goed nog eens te kijken naar waterstromen. Een blikje wordt helemaal met water gevuld. Het blikje stroomt leeg door een uitstroomopening onderin, zoals in figuur 9 (boven). De waterstraal wordt steeds minder krachtig als het waterpeil in het blikje daalt. Je kunt de stroomsterkte (in liter/s) meten. De stroomsterkte hangt af van de waterhoogte en dus van de waterdruk.

Het is lastig dat de waterhoogte in het blikje verandert. Dat kunnen we veranderen door een kraan open te zetten boven het blikje, zoals in figuur 9 (onder). We krijgen een constante waterhoogte door aan de zijkant een gaatje op de gewenste hoogte te maken. Aan de uitstroomopening maken we een horizontale slang vast met twee slangklemmen. Door de slang aan te sluiten, neemt de stroomsterkte sterk af. Dat wordt nog sterker als we de slangklemmen gedeeltelijk dicht draaien. Kennelijk werken de slang en de slangklemmen de stroom tegen. Deze tegenwerking noem je *weerstand*.

Tussen waterdruk, weerstand en stroomsterkte bestaat het in de tabel van figuur 10 weergegeven verband. Waterdruk voor water in leidingen kan daardoor als analogie dienen voor spanning in een elektrische schakeling. Bekijk de elektrische schakelingen van figuur 11.

- Sluit steeds meer lampjes aan. Het aantal batterijen blijft gelijk. De lampjes branden minder fel. Of anders gezegd: maak de weerstand groter, de spanning blijft gelijk, en de stroomsterkte wordt kleiner.
- Sluit steeds meer batterijen aan. Er blijft één lampje. Het lampje gaat feller branden. Of anders gezegd: maak de spanning groter, de weerstand blijft gelijk, en de stroomsterkte wordt groter.



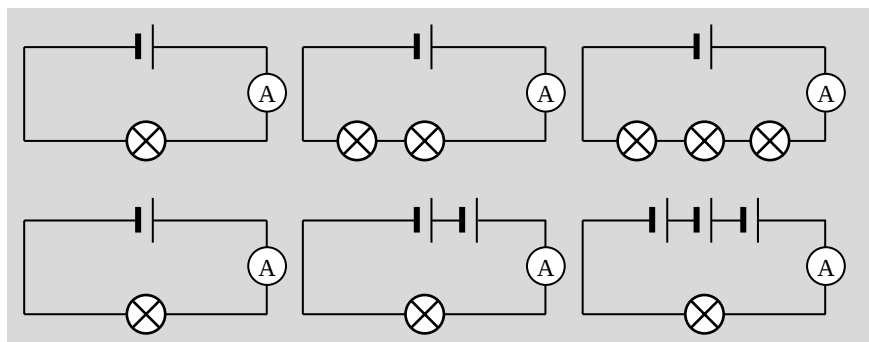
Figuur 9

waterdruk	weerstand	stroomsterkte
groter	gelijk	groter
gelijk	groter	kleiner
groter	groter	?

Figuur 10

batterijen spanning	lampjes weerstand	felheid stroomsterkte
groter	gelijk	groter
gelijk	groter	kleiner
groter	groter	?

Figuur 12



Figuur 11

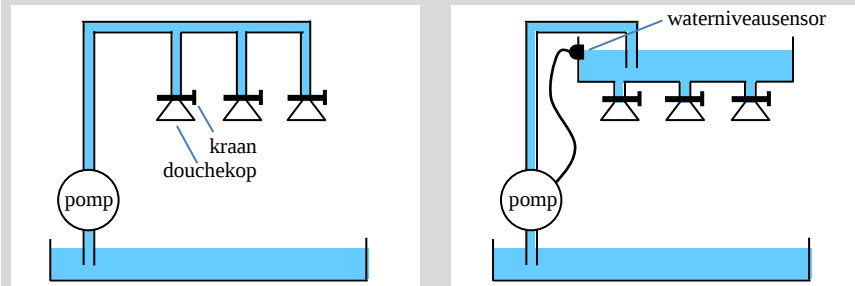
Er geldt: de spanning van de batterij stuwt de stroom voort, en de stroom wordt tegengewerkt door de weerstand van de lampjes, zoals weergegeven in de met figuur 10 vergelijkbare tabel van figuur 12.

De in het kader hieronder geschetste situaties kunnen helpen bij het maken van een onderscheid tussen spanningsbron en stroombron.

Kampdouche

Bij de scouting wordt een survivaltocht gehouden. In het kamp wordt een kookplaats gemaakt met een afwasrek, een wc en drie douches. De meest simpele oplossing voor dat laatste is een waterpomp en een slang met drie douchekoppen. Een veel betere oplossing maakt gebruik van een voorraadvat voor water. Wat maakt die laatste oplossing veel comfortabeler?

In figuur 13 links gaat het om een waterpomp die water in een slang pompt die zich splitst in drie douchekoppen. Aan een douchekop is een kraan bevestigd die open en dicht gezet kan worden. In de praktijk geeft een pomp water af met horten en stoten. Het water zal dus ook met horten en stoten uit de kraan komen. Bij het openen van meerdere kranen blijft het debiet (stroomsterkte in liter/s) in de hoofdleiding vrijwel onveranderd, maar het debiet in iedere kraan neemt sterk af. Dat komt doordat de waterpomp een tamelijk constant waterdebiet heeft. De waterpomp levert een constante stroom, ongeacht de aangesloten waterleiding.



Figuur 13 – Een kampdouches in twee varianten: zonder (links) en met (rechts) voorraadvat.

In figuur 13 rechts is een voorraadvat toegevoegd aan de kampdouches. Er wordt niet constant gepompt, maar net zo hard dat het waterniveau in het voorraadvat op peil blijft. Je kunt je afvragen welke invloed het watervat en deze manier van pompen heeft. Allereerst wordt de waterstroom door de douches veel gelijkmatiger. Verder zal bij het openen van meerdere kranen het debiet in de douchekop ongeveer hetzelfde blijven. Het uitstromende water voelt steeds dezelfde waterdruk – als tenminste het water in het voorraadvat steeds voldoende wordt aangevuld.

Het bovenstaande vormt een analogie voor de elektrische stroomkring, inclusief het onderscheid tussen stroom- en spanningsbronnen. Een stroombron levert dezelfde stroom, ook al verandert de schakeling. Een spanningsbron levert dezelfde spanning, ook al verandert de schakeling. Verandert bij een spanningsbron de schakeling, dan zal ook de stroom in de schakeling veranderen.

Water in leidingen	Elektrische schakeling
Waterpomp zonder voorraadvat (of watertoren)	Stroombron
Waterpomp met voorraadvat (of watertoren)	Spanningsbron
Leidingen of slangen	Bedrading
Douchekop	Weerstand
Kraan	Schakelaar
Water stroomt	Elektronen stromen
Watermeter	Stroommeter
Debiet (liter/s)	Stroomsterkte (A)
Douchekop heeft weerstand	Lampje of weerstand (object) heeft weerstand (grootte)

Figuur 14 – Overeenkomsten tussen de analogie van water in leidingen en de elektrische schakeling.

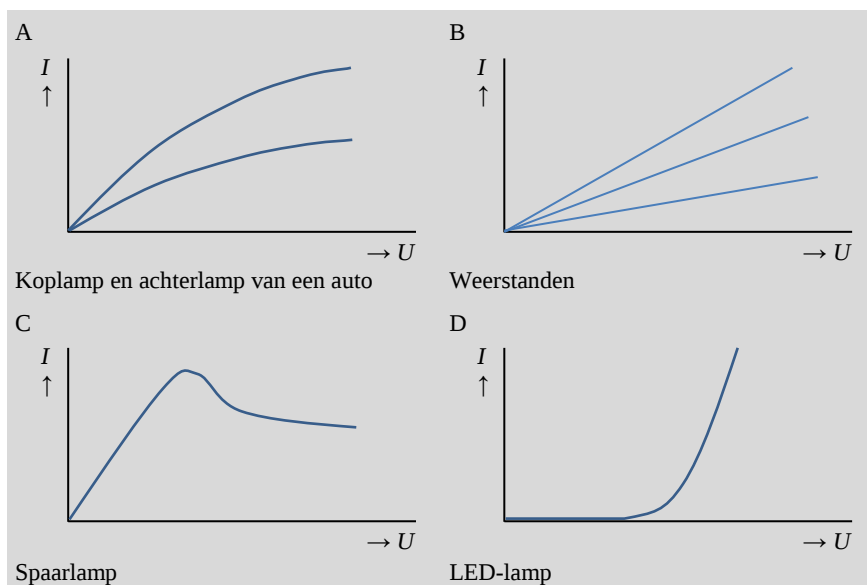
spanning	weerstand	stroomsterkte
groter	gelijk	groter
gelijk	groter	kleiner
groter	groter	?

Figuur 15

Weerstandregel

In het voorgaande is weerstand al naar voren gekomen. Weerstand mag je zien als tegenwerking van de stroom, zoals weergegeven in de tabel van figuur 15.

In het derde leerjaar kan de onderlinge afhankelijkheid van spanning, stroomsterkte en weerstand worden weergegeven door de volgende formule die weerstand definieert: $R = U/I$. Dat voorwerpen verschillende weerstand hebben, is te zien in de I, U -diagrammen van figuur 16: als de spanning toeneemt, neemt de weerstand van de lampjes toe (warmteontwikkeling), blijft de weerstand van weerstanden constant, heeft de weerstand van een spaarlamp een grillig verloop, en neemt weerstand van een LED-lamp af.



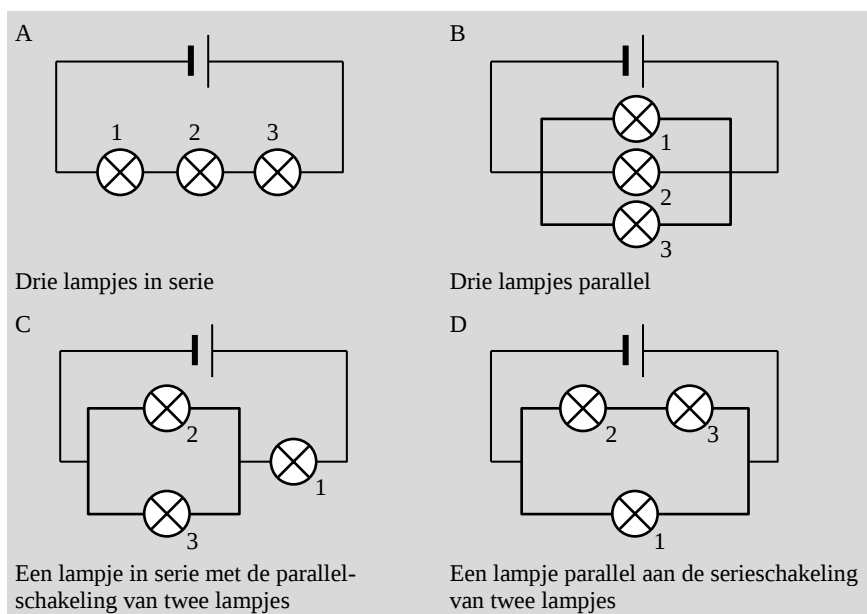
Figuur 16

Vakregel – De weerstandsregel luidt $U = I \cdot R$, met U de spanning van de bron (in volt: V), I de stroomsterkte in de bedrading (in ampère: $1 \text{ A} = 6,3 \cdot 10^{18}$ elektronen/s) en R de weerstand van de lamp, de kachel of het apparaat (in ohm: Ω).

De wet van Ohm luidt: de weerstand is constant voor metaaldraden die op een vaste temperatuur worden gehouden.

Spanningsregel

In het vierde leerjaar rekenen leerlingen aan spanning en stroomsterkte in samengestelde schakelingen. Om de denkbeelden van leerlingen daarover te inventariseren, kun je gebruik maken van opstellingen met de schakelschema's van figuur 17.



Figuur 17 – Elke schakeling bestaat uit aansluitpunten voor een voeding, snoeren en drie identieke lampjes. De richtvraag is: In welke schakeling kunnen alle lampjes tegelijk normaal branden? Wat gebeurt er met de andere lampjes als je één lampje losdraait?

Vakregel – Leerlingen brengen hier allerlei argumenten naar voren. Voor een volledig antwoord moeten ze gebruik maken van de spanningsregel. Deze

spanningsregel luidt: bij een rondgang in een stroomkring is de spanning over de batterij gelijk aan de som van de spanningen over de weerstanden. De *stroomregel* blijft: de stroomsterkte in de hoofdtak is gelijk aan de som van de stroomsterktes in de deeltakken. En de *weerstandsregel* wordt uitgebreid tot $U_i = I_i \cdot R_i$, met U_i de spanning die staat over een weerstand met weerstandswaarde R_i en met I_i de stroom door de weerstand.

Realiseer je dat spanning van een eigenschap van de batterij nu een veranderlijke grootheid is geworden in de schakeling.

Energieregulering

De proef met de gloeiende draad die je onderdompelt in water (zie figuur 18) is een mooi instapprobleem voor warmteontwikkeling in een weerstand in het vierde leerjaar. Door de spanning van de spanningsbron langzaam op te draaien, gaat de draad gloeien. Let eens op waar wel en waar niet. Door te blazen houdt de draad op met gloeien, en als je weer stopt met blazen begint het gloeien opnieuw. De vraag is wat er gebeurt als je de draad onderdompelt in water. Voor het gemak delen we de draad op in drie delen (in serie): het gedeelte boven water, het gedeelte onder water en andere gedeelte boven water. Wat gebeurt er met de draad onder water? Wat gebeurt er met de draad boven water? Maakt het uit of de draad van ijzer is of van constantaan?

Voor de oplossing is van belang dat je een idee hebt van de grootte van de weerstand van water. De orde-groottes zijn: metaaldraad 1Ω , water $1 \text{ k}\Omega$ en lucht $1 \text{ M}\Omega$. Dit betekent dat het water geen kortsluiting geeft. Waarom is water en elektriciteit dan wel gevaarlijk?

Voor het gedeelte onder water is van belang dat het gloeien afhangt van het evenwicht tussen de geproduceerde warmte door de elektrische stroom en de afgegeven warmte aan de omgeving. De afgifte van warmte onder water is zo goed, dat de temperatuur van de draad ongeveer de watertemperatuur is zodat de draad niet meer gloeit. Boven water verandert de weerstand ook als de draad van ijzer is. Een hogere temperatuur geeft een grotere weerstand.

Een ander aardig toepassingsprobleem is het gebruik van een verlengsnoer. Een opgerold snoer smelt eerder dan een uitgerold snoer. Leerlingen brengen allerlei ideeën naar voren, soms erg onverwacht (zoals in het kader hiernaast).

De weerstand van een opgerold snoer

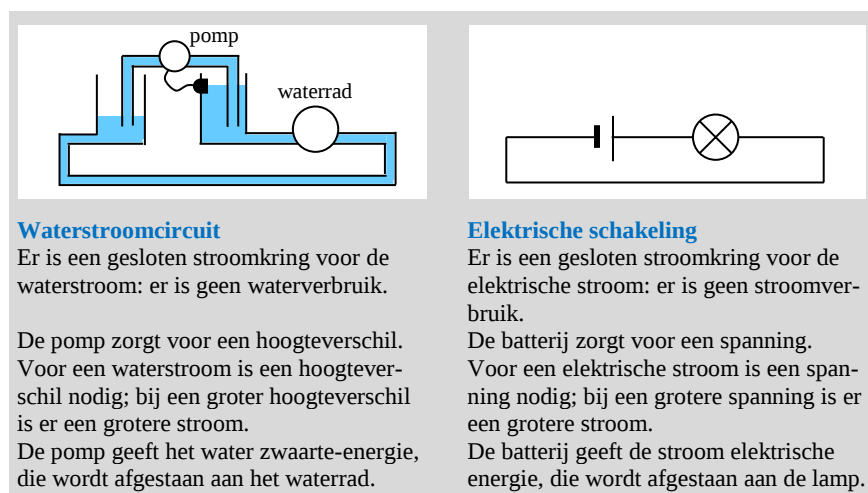
Leerlingen kregen als probleem voorgeschoteld hoe het kan dat een opgerold verlengsnoer gaat smelten, terwijl in dezelfde situatie een uitgerold verlengsnoer niet smelt.

Een van de leerlingen vond dat heel logisch. Een opgerold verlengsnoer heeft een grotere weerstand (denk maar aan een tuinslag die je oprolt of knikt), en meer weerstand betekent meer warmteontwikkeling. QED.

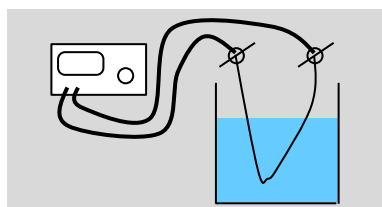
Spanning: veroorzaker van stroom of leverancier van energie

Je zult gemerkt hebben dat je steeds op twee manieren kunt kijken naar het begrip spanning.

- Bij spanning als veroorzaker van stroom zie je spanning in relatie tot weerstand en stroom ($U = I \cdot R$).
- Bij spanning als leverancier van energie zie je spanning als energie die meegegeven wordt aan de stroom ($P = U \cdot I$).



Figuur 19 – In de waterstroomanalogie zijn beide manieren waarop je naar spanning kunt kijken zichtbaar.



Figuur 18 – De opstelling bij het instapprobleem voor de energieregel.

Taalgebruik

Een bijkomend aspect is het taalgebruik. Je kunt er niet om heen dat alle termen die gebruikt worden bij een elektrische stroomkring associaties oproepen met waterstromen. Ter illustratie staat in het kader hieronder de betekenis van de woorden spanningsbron, stroombron, bron, stroom en spanning volgens *Van Dale*.

Uit: *Van Dale – Groot woordenboek der Nederlandse taal*

Spanningsbron – (elektr.) punt van waaruit spanning afkomstig is.

Stroombron – toestel of werking waarmee elektrische energie opgewekt kan worden (bijvoorbeeld een dynamo, een accu, een motor).

Bron – vanzelf uit de grond opwellend water, plaats van oorsprong van een rivier.

Stroom – zich voortbewegende massa van stoffen die aan een watermassa doen denken of er mee worden vergeleken.

Spanning – druk die een gas of vloeistof op de wand van een vat uitoefent, door de neiging zich te willen verspreiden.

Het taalgebruik in de natuurkunde is veel preciezer. De omschrijving van spanningsbron maakt gebruik van de termen die associaties met beweging en stroom oproepen, terwijl wij spanning beschouwen als een statisch gegeven. De elektrische energie staat bij stroombron en niet bij spanningsbron. Een bron is de oorsprong van de stroom, terwijl wij het willen zien als het doorgeven van de stroom (met behoud van stroom). Spanning wordt geassocieerd met de druk die vloeistof of gas in beweging zet, of een druk die ontstaat door het willen wegvloeien van een gas of vloeistof. Denk daarbij aan het opblazen en leeglopen van een ballon. Het woord spanning associeert in het geheel niet met de nu vaker gebruikte opvatting waarin spanning wordt omschreven als meegeven van energie aan een elektrische stroom. In de eerder gebruikte analogieën: boterhammen die meegegeven worden aan leerlingen die met een rugzakje rondlopen, of warmte die meegegeven wordt aan de waterstroom in een centrale verwarming.

Een analogie gebruiken?

Leerlingen zullen bij hun uitleg gebruik maken van een voorstelling van stroom die analoog is aan de stroming van water door leidingen (bijvoorbeeld water in een tuinslang). Leraren gebruiken vaak een wat meer uitgewerkte analogie (bijvoorbeeld de centrale verwarming). De vraag is of deze voorstelling de leerlingen zal helpen tot een juiste oplossing van het probleem te komen, of dat deze voorstelling aanleiding geeft tot (nog meer) begripsproblemen.

Uit het taalgebruik blijkt dat er bij een elektrische schakeling sprake moet zijn van iets dat stroomt, terwijl je echt niet iets ziet stromen. Dit betekent dat elektrische stroom een theoretisch begrip is, dat niet voortkomt uit de directe waarneming. Je kunt elektrische stroom voorstellen als een stroom van elektronen, vergelijkbaar met water dat in leidingen stroomt.

Een eerste eis die je aan een analogie stelt, is dat de analogie een concrete voorstelling biedt, dat er voldoende overeenkomsten zijn tussen de elektrische stroomkring en de analogie, en dat de leerlingen binnen deze analogie eigen redeneringen kunnen houden die zeggingskracht hebben voor de elektrische stroomkring. Daarmee valt de analogie van een stromende rivier af. Omdat een rivier geen stroom in een afgesloten leiding is, zijn de overeenkomsten met de elektrische stroomkring te gering. Het sluiten van de stuw bij Hagestein wordt in Lopik niet gemerkt, terwijl het afsluiten van de sproeier van een tuinslang overal in de slang gevolgen heeft.

Een analogie voor een elektrische schakeling moet aan een aantal kenmerken voldoen:

- De analogie is eenvoudiger, bekender en concreter voorstelbaar.
- Binnen de analogie moeten leerlingen redeneringen kunnen maken.
- De uitkomsten van de redeneringen zijn ook van toepassing op de elektrische stroomkring.

In de tabel van figuur 20 zijn voor een aantal analogieën de overeenkomsten met de elektrische stroomkring op een rij gezet, evenals hun beperkingen (waar

dus geen overeenkomst meer is).

	Overeenkomsten	Beperkingen
Verkeersstromen	Wegennet ↔ bedrading Autostrroom ↔ elektronenstroom Wegversmalling ↔ dünnere bedrading Ophaalbrug ↔ schakelaar Splütsing ↔ splütsing (stroomregel)	Geen bron
Tuinsproei-installatie	Water in een slang ↔ elektronen in leidingen Waterdruk / hoogte sproeier ↔ spanning Versmalling ↔ dünnere draad Weerstand ↔ weerstand	Geen energietransport
Kampeerdouche, met en zonder voorraadvat	Waterpomp zonder voorraadvat ↔ stroombron Waterpomp met voorraadvat ↔ spanningsbron Waterstroom ↔ elektronenstroom Watermeter ↔ stroommeter Drukmeter ↔ spanningsmeter Waterleiding ↔ bedrading Kraan ↔ schakelaar Douchekop ↔ weerstand	Geen energietransport
Centrale verwarmingsinstallatie	Brander en warmtewisselaar ↔ energiebron Leidingen ↔ bedrading Pomp ↔ stroombron Kringregel voor water ↔ kringregel voor elektronenstroom Warmtetransport ↔ energietransport Radiator ↔ lampje cq apparaat	Geen spanningsbron
Bloedsomloop	Hart ↔ spanning- en stroombron Bloeddruk ↔ elektronenspanning Bloedstroom ↔ elektronenstroom Stroomregel ↔ stroomregel Drukregel ↔ spanningsregel	Geen energietransport (wel stoffetransport)

Figuur 20 – Overeenkomsten en beperkingen van verschillende analogieën voor de elektrische stroomkring.

Voorkennis – Om water in leidingen als analogie te kunnen gebruiken, is voorkennis over enkele eigenschappen van waterstromen nodig. Bijvoorbeeld:

- debiet D = hoeveelheid /seconde
- hoeveelheid = aantal, volume (m^3) of massa (kg)
- stroomsnelheid = snelheid van stromende deeltjes (m/s)
- $D \text{ (m}^3/\text{s)} = A \cdot v$ of $D \text{ (kg/s)} = \rho \cdot A \cdot v$

Analogie, model en theorie – Meestal wordt in schoolboeken gekozen voor het woord model in plaats van het woord analogie. We hebben een duidelijke voorkeur voor het woord analogie – met de door *Van Dale* gegeven omschrijving (zie het kader hieronder) – boven het verwarrende woord model. De analogie van water in leidingen gaan we zeker niet gebruiken om de elektrische stroomkring te modelleren en kwantitatieve uitspraken te doen.

Uit: *Van Dale – Groot woordenboek der Nederlandse taal*

Analogie – een overeenkomst die men vaststelt en tot grondslag neemt voor een redenering en gevolgtrekking, *bij analogie redeneren* de waarheid van iets uit overeenkomstige gevallen afleiden.

Model – (in de moderne wetenschappelijke opvatting) empirische interpretatie van een mathematisch-logisch systeem, *het model fungeert als eerste aanzet tot theorievorming, een model is een schematisering van de werkelijkheid met een operationeel karakter*.

Theorie – systeem van denkbeelden of veronderstellingen (hypotheses) waarmee waargenomen feiten of verschijnselen worden verklaard of voorspellingen kunnen worden gedaan.

Aanbeveling: Gebruik bij het onderwijs in elektrische schakelingen liever het woord analogie dan het woord model.

Aanbevelingen

- Stel je elektrische stroom voor als water in leidingen (en niet als water in rivieren).
- Maak vanaf het begin onderscheid tussen een bron die een contante stroom levert (dynamo, waterpomp) en een bron met een zich aanpassende stroom (batterij, waterpomp met voorraadvat).
- Stel je spanning voor als drukverschillen bij waterstromen (bloeddruk bij de bloedsomloop) of gasstromen (overdruk bij een opgeblazen ballon) en niet als energie per seconde (warmtetransport bij het centrale verwarmingsmodel).
- Wees je bewust van de overgang van betekenis van de spanning U uit de weerstandsregel $U = I \cdot R$. De betekenis verschuift hierbij van spanning van de bron (pompvoorstelling) naar spanning over een weerstand in de schakeling (drukvoorstelling).

Bronnen

- Mooldijk, A. (2008). Intuïtieve begrippen versus vakbegrippen. Utrecht: Ecent.
- Licht, P. & Snoek, M. (1986). Elektriciteit in de onderbouw. Een inventarisatie van begrips- en redeneerproblemen bij leerlingen. *NVON-Maandblad* 11(11), 32-36.
- Licht, P. (1987). Een model voor het elektriciteitsonderwijs. *NVON-Maandblad* 12(6), 264-267.
- Van den Berg, E., Grosheide, W., Breedijk, J. & Schouten, A. (1995). Misconcepties, elektriciteit, energie en basisvorming. *NVON-Maandblad* 20(6), 257-259.