

6 Begripsontwikkeling

6.1 Inleiding

Dit hoofdstuk gaat over de begripsontwikkeling van leerlingen in de verschillende leerstofdomeinen van het vak natuur- en scheikunde in het vmbo en de onderbouw havo/vwo. Welke leerstofdomeinen in het curriculum aan de orde komen, hangt voor het vmbo af van de leerweg en de bijbehorende examenprogramma's (zie hoofdstuk 8) en voor de onderbouw havo/vwo van de school/sectie. Uit de inhoud van die leerstofdomeinen is een selectie gemaakt van onderdelen waarbij nogal eens begripsproblemen bij de leerlingen optreden of onderdelen die in leerboeken nogal eens te weinig aandacht krijgen en daardoor begripsproblemen oproepen. Daarbij besteden we ook aandacht aan de denkbeelden die leerlingen kunnen hebben over begrippen, relaties, theorieën en modellen op grond van hun ervaringen in het dagelijks leven en hoe de betreffende leerstof kan worden behandeld, zonder onderscheid te maken tussen de verschillende leerwegen in het vmbo. Bij de in dit hoofdstuk genoemde leerlingdenkbeelden moet overigens worden aangetekend dat zij niet bij alle leerlingen leven, en dat ze in verschillende mate en op verschillende momenten kunnen opduiken, afhankelijk van onder andere het leerjaar en het voorafgaande natuur- en scheikundeonderwijs.

De *centrale vraag* voor dit hoofdstuk is: hoe is de begripsontwikkeling van leerlingen – gezien het karakter van de mogelijke leerlingdenkbeelden en didactische benaderingen – in de verschillende leerstofdomeinen te stimuleren?

6.2 Leerlingdenkbeelden

In alle schoolvakken speelt het leren van vakbegrippen en -redeneringen een rol. Uit vakdidactisch onderzoek is bekend dat, als het om begripsontwikkeling gaat, onderwijs minder succesvol is dan wordt gedacht of gehoopt. Leerlingen leren wel de vaktermen te gebruiken, maar de betekenis die ze eraan toekennen verschilt vaak van de geaccepteerde natuurwetenschappelijke betekenis. Dat komt tot uiting in begripsproblemen: veel leerlingen geven heel andere dan de gewenste antwoorden als hen begripsvragen worden voorgelegd. Ze blijken dan vast te houden aan begrippen en redeneringen die voortkomen uit hun alledaagse ervaringen. Een oorzaak daarvan is dat het natuur- en scheikundeonderwijs hen vaak in het ongewisse laat waar de oude redenering tekort schiet, wat het gevolg van dat tekortschieten is voor de betekenis van de gebruikte begrippen en waarom dus een andere betekenisgeving gewenst is. Voor veel leerlingen komt het vak met oplossingen, terwijl er voor hen (nog) geen probleem is. Met als gevolg dat ze te weinig uitgedaagd en gemotiveerd worden om zich in de vakredenering te verdiepen.

De oplossing van dit probleem moet niet gezocht worden in het afwijzen van leerlingredeneringen, maar in het gebruik maken ervan als stuwende kracht bij begripsontwikkeling. Leerlingen moeten uitgedaagd worden hun redeneringen te expliciteren, voorspellingen te doen en die te controleren, bijvoorbeeld door experimenten te bedenken en logische redeneringen toe te passen. Zo worden hun ideeën en de begrippen die eruit voortkomen ter discussie gesteld. Interactie met medeleerlingen en de leraar is daarbij essentieel.

In deze paragraaf gaan we in op vier mogelijke reacties op 'onverwachte' leerlinguitspraken en de bijdrage die deze reacties al dan niet aan de begripsontwikkeling van leerlingen kunnen leveren.

Lespraktijk

- Lr1 Stel nu dat je al dat ijs en de glasscherven gaat wegen, hoeveel denk je dat dat weegt samen?
- Els Nou, meer dan dat... lijkt me, meer dan die 1000 g.
- Lr1 Maar aan het begin hè, aan het begin hadden we die bak gevuld met water en dat woog 1750 g.

Figuur 212 – Lesprotocolfragment met een verwerpende reactie van de leraar.

Lespraktijk

- Els Oh... Ja, die lucht is eruit [uit het water/ijs]... ehm...
- Lr1 Ja, ik ga dat dus gewoon wegen.

Figuur 213 – Lesprotocolfragment met een negerende reactie van de leraar.

Leraar-reacties

Als leraren in de klas geconfronteerd worden met uitspraken van leerlingen waarin ‘leerlingdenkbeelden’ doorklinken, zijn er globaal vier manieren waarop zij kunnen reageren: *verwerpen*, *negeren*, *erkennen* en *anticiperen*. Verwerpen en negeren lijken weinig bij te dragen aan begripsontwikkeling. Maar erkennen en anticiperen kunnen ertoe leiden dat leerlingen hun redeneringen expliciteren, zodat die productief gemaakt kunnen worden voor begripsontwikkeling.

Verwerpen – Een leraar (Lr1 in figuur 212) geeft een individuele les aan Els (2-havo) over dichtheid, een onderwerp dat ze in de gewone les niet begrepen had. De leraar heeft de les voorbereid en neemt als voorbeeldsituatie: als water bevriest, zet het uit en dus is de dichtheid van ijs kleiner dan die van water. Els blijkt niet te weten dat water uitzet als het bevroert. Daarom neemt de leraar de situatie dat hij een glazen bak van 750 g met 1000 g water vult en in het vriesvak zet. Hij stelt dat het ijs na enige tijd is bevroren en de bak is gebroken.

Els is op het water gericht en denkt dat het water (1000 g) ‘meer’ weegt. Ze geeft dus niet het antwoord dat de leraar wil (namelijk 1750 g). Hij verwerpt haar antwoord, wat je kunt zien aan het woord ‘maar’ waarmee hij zijn zin begint. Meestal leidt een verwerpende reactie ertoe dat de leerling het antwoord niet verder uitwerkt maar de leraar zijn/haar oplossing laat geven. Dat geldt ook voor de volgende reactie.

Negeren – De leraar richt de aandacht opnieuw op het ijs en de glasscherven, en Els reageert daarop.

De leraar (Lr1 in figuur 213) zegt wel ‘ja’, maar gaat helemaal niet door op wat Els zegt: hij negeert het. Toch kan het heel goed zijn dat Els hier eigenlijk een argument geeft voor haar idee dat het ijs zwaarder is dan het water. Een typische leerlingredenering is: iets wordt zwaarder als er lucht uit gaat, lucht heeft een soort negatief gewicht. Door het negeren wordt Els weer niet gestimuleerd haar gedachten te verwoorden.

Erkennen – Bij Lia, een andere leerling, loopt het anders. Bij haar gaat de les over de vraag of lucht gewicht heeft. Lia heeft een idee dat lijkt op dat van Els. De leraar (Lr2 in figuur 214) begrijpt haar echter niet, vraagt door en daardoor wordt Lia’s redenering (een beetje) duidelijk.

Lespraktijk

- Lr2 De vraag is dus: wordt een opgepompte bal lichter als je hem leeg laat lopen?
- Lia Nee.
- Lr2 Hoe kom je daarbij?
- Lia Nou, ik heb wel eens een plastic bal in de vijver getrapt en toen bleef ie drijven. En een leren bal ook.
- [Lr2 blijft doorvragen, en uiteindelijk zegt Lia]
- Lia Maar dat weegt toch niet, lucht?
- Lr2 Lucht weegt niet?
- Lia Nou, dat is toch zo? Een lekke bal is toch niet zwaarder als je die op een weegschaal zet dan een volle bal, of wel?
- Lr2 Nou...
- Lia Heb ik zo’n idee, ik bedoel: als ik een lekke bal trap, dat is zwaarder dan als ik gewoon een volle bal trap.

Figuur 214 – Lesprotocolfragment met een erkennende reactie van de leraar.

De leraar toont zich geïnteresseerd in wat Lia bedoelt: hij vraagt door, herhaalt en laat zo merken dat hij luistert. Deze gesprekstechnieken dragen ertoe bij dat Lia zich erkend voelt. Ze stimuleren haar niet alleen tot het verduidelijken van haar redenering, maar hebben ook tot gevolg dat ze een productieve vakactiviteit voorstelt: laten we maar eens wegen!

Anticiperen – Als de leraar kennis heeft van en gevoelig is voor de inhoud van leerlingredeneringen, kan hij/zij erop anticiperen.

De leraar (Lr3 in figuur 215) weet uit de vakdidactische literatuur dat het voor onderbouwleerlingen moeilijk is de energie van elektrische stroom en de stroom zelf van elkaar te onderscheiden. Uit de manier waarop haar leerlingen Mirjam en Fatima uit 3-havo een opgave over een schakeling proberen op te los-

sen, maakt zij op dat dit ook nog een beetje voor hen geldt. Dus bedenkt zij een productieve vaksituatie waarin dit probleem aan de orde kan komen.

Lespraktijk

Lr3 Maakt het dan nog uit of de stroommeter vóór of achter het lampje staat?
Fatima Volgens mij moet hij er achter staan, want dan heeft het lampje energie verbruikt en dan kun je dus opmeten hoeveel energie er nog in de stroom zit.
Lr3 En wat vind jij Mirjam?
Mirjam Eh, ja, een lampje gebruikt toch geen stroom? Dus het maakt niet uit.
Lr3 Het maakt niet uit Fatima?
Fatima Ja, dat is wel waar. Dus de stroom blijft gewoon rondgaan en de energie wordt aan het lampje afgegeven om licht te geven.

Figuur 215 – Lesprotocolfragment met een anticiperende inbreng van de leraar.

Het resultaat is dus dat Fatima zelf haar aanvankelijke idee dat de stroommeter energie meet (en dat stroom dus energie is) corrigeert. Het anticiperen van de leraar bestaat uit het aan de orde stellen van juist die situatie (stroommeter vóór of achter het lampje) die een karakteristiek ‘fout’ antwoord bij de leerling met het betreffende begripsprobleem uitlokt.

De leraar-reacties erkennen en (vooral) anticiperen vragen om het ontwikkelen van een gevoeligheid voor leerlingredeneringen, door in de lespraktijk voortdurend attent te zijn op ‘afwijkende’ of onverwachte uitspraken of gedragingen van leerlingen – zie de voorbeelden in figuur 216. Dus: door te reflecteren op observaties in de eigen lespraktijk (en zo mogelijk die van anderen). Kennis van de resultaten van vakdidactisch onderzoek naar leerlingdenkbeelden in de verschillende leerstofdomeinen kan daarbij helpen.

Lespraktijk

Hieronder staan twee observaties van onverwachte gebeurtenissen in de lespraktijk, en hoe je daarmee als leraar kunt omgaan.

Leerlinguitspraken – De leraar geeft een les over het gewicht van lucht. Als onderdeel daarvan weegt zij een glazen bol, pompt de lucht eruit met een vacuümpomp en weegt nogmaals de bol. Tijdens het leegpompen hoort zij enkele leerlingen zeggen: “Die wordt toch niet lichter, maar zwaarder?” Dat is voor haar onverwacht: denken leerlingen dat echt?

Tijdens dezelfde les in een parallelklas vraagt zij daarom, voordat zij de vacuüm gepompte bol gaat wegen: “Wie denkt dat de bol zwaarder is geworden? Vingers!” Ongeveer de helft van de klas steekt zijn vinger op...

Leerlinggedrag – De leraar laat leerlingen een practicum doen waarin ze water in een bekersglas met een brander verwarmen en om de paar minuten de temperatuur meten. Na afloop maken de leerlingen een grafiek van de temperatuur uitgezet tegen de tijd. Hij merkt op dat een groepje een heftige discussie voert als het water kookt: doormeten of stoppen? Hij ziet dat ze besluiten te stoppen en vraagt zich af wat daarachter zit.

Daarom komt hij er de volgende les op terug bij het bespreken van de proef. Hij vraagt het betreffende groepje naar hun grafiek en laat hen die op het bord tekenen. Hun grafiek stopt als de temperatuur van het water eenmaal 100 °C is. De leraar reageert daarop met de vraag: “Waarom zijn jullie daar gestopt met meten?”. En dan vertellen ze dat ze niet wilden hebben wat een ander groepje tijdens het practicum overkwam: de thermometer knapte toen ze de temperatuur van de vlam wilden meten. Het betreffende groepje was bang dat hen dat ook zou overkomen, omdat de temperatuur van het water tijdens het koken volgens hen boven de 100 °C zou komen. De grafiek van een ander groepje laat daarna zien dat dat niet het geval is...

Figuur 216 – Voorbeelden van attent zijn en reageren op onverwachte gebeurtenissen in de lespraktijk.

6.3 Kracht, evenwicht en beweging

In het tweede leerjaar wordt het krachtbegrip geïntroduceerd en in het derde en vierde leerjaar verder uitgebouwd. Dat gaat voor veel leerlingen gepaard met begripsproblemen. Het gebruik van instaproblemen en brugvoorbeelden kan hel-

pen om het begrip van de leerlingen te vergroten. Maar een eerste oplossing voor deze begripsproblemen kan ook worden gevonden door het herformuleren van de wetten van Newton voor gebruik in het voortgezet onderwijs.

Kracht

De mogelijke leerlingdenkbeelden rond het begrip kracht zijn samengevat in figuur 217.

Leerlingdenkbeelden

- Leerlingen denken dat alleen levende wezens krachten kunnen uitoefenen. En als leerlingen denken dat niet-levende wezens dat ook kunnen, dan focussen ze op voorwerpen die andere voorwerpen kunnen laten bewegen.
- Een kracht zit in het voorwerp, en is daarmee een eigenschap van het voorwerp. Krachten worden overgedragen van het ene naar het andere voorwerp.
- Een kracht is een eigenschap van één enkel voorwerp, in plaats van een eigenschap van de interactie tussen twee voorwerpen.
- Krachten worden gezien als ‘invloeden’: wrijving is geen kracht maar iets wat ervoor zorgt dat een voorwerp tot stilstand komt, gravitatie is geen kracht maar iets wat ervoor zorgt dat een voorwerp valt.

Figuur 217 – Mogelijke leerlingdenkbeelden rond het begrip kracht.



Figuur 218 – Een concept cartoon rond kracht bij ‘armpje drukken’.

Lespraktijk



Figuur 219 – Instapprobleem voor het begrip aangrijpingspunt.

De ontwikkeling van het begrip *kracht* begint in het tweede leerjaar. Opmerkelijk is dat er in leerboeken veel nadruk wordt gelegd op het feit dat je een kracht niet kunt zien, maar voelen des te beter. Het begrip kracht kan dan ook goed geïntroduceerd worden vanuit de zintuiglijke waarneming: een kracht kun je niet zien, maar wel voelen.

Een instap voor het begrip kracht kun je ontleen aan het fitnesscentrum. Het instapprobleem kan zijn: ‘Hoe weet je wie het sterkst is? Waaraan zie je dat?’ Je kunt een kracht voelen en je weet hoe groot die is door te kijken naar de uitrekking van veren of naar het gewicht van halters of contragewichten.

Bij alledaagse verschijnselen is er sprake van een kracht als:

- de *beweging* van een voorwerp wordt veranderd of in stand wordt gehouden;
- een voorwerp van *plaats* wordt veranderd of op zijn plaats wordt gehouden;
- een voorwerp van *vorm* wordt veranderd of in een andere vorm wordt gehouden.

Deze regels gelden omdat in de context van alledaagse bewegingen altijd sprake is van enige en soms veel weerstand.

Je kunt een kracht meten door te vergelijken hoe ver een veer wordt uitgerekt door beide krachten. Dit is het mechanisme van een krachtmeter. Bij de kracht hoort de eenheid newton (N). Het blijkt dat een massa van 1,00 kg een gewicht heeft van 9,81 N.

Samenvattend: een kracht voel je met je spieren, het effect van krachten kun je zien, en een kracht meet je met een krachtmeter (in N).

Krachten laten zich benoemen naar de aard van het fysische verschijnsel. Je hebt spierkracht van mens of dier (trekken, duwen, tillen, slepen), zwaartekracht, magnetische kracht, elektrische kracht, motorkracht (lier, hijskraan), veerkracht, windkracht enzovoort.

Een kracht kun je je voorstellen als een pijl met beginpunt. Drie kenmerken van een kracht en een pijl komen overeen:

- de lengte van de pijl staat voor de grootte van de kracht;
- de richting van de pijl staat voor de richting van de kracht;
- het beginpunt van de pijl staat voor het aangrijpingspunt van de kracht.

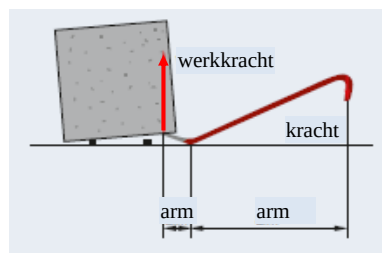
Om het aangrijpingspunt te problematiseren kun je leerlingen het instapprobleem van figuur 219 voorleggen.

Voor puntmechanica is de keuze van het aangrijpingspunt eenduidig. Zodra het gaat om echte voorwerpen of voertuigen is de keuze van het aangrijpingspunt lastiger. Logische keuzes zijn:

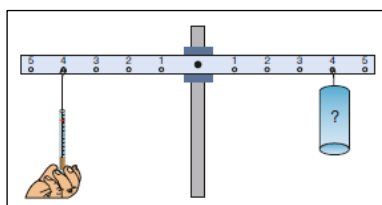
- het aangrijpingspunt van de zwaartekracht is het zwaartepunt, meestal het midden van het voorwerp;



Figuur 220 – Een concept cartoon rond kracht en druk.



Figuur 222 – Het gebruik van een hefboom voor het vergroten van een kracht. Bron: *Overal NaSk vmbo-B, Leerwerkboek 4A* (pg. 98).



Figuur 223 – De balans voor het afleiden van de balansregel. Bron: *Overal NaSk vmbo-B, Leerwerkboek 4A* (pg. 91).

- bij een contactkracht is het contactpunt het aangrijpingspunt; bijvoorbeeld met een touw trekken aan een kist, met je handen duwen tegen een kast en de normaalkrachten op een auto.

Lastiger keuzes zijn: de luchtweerstand op een auto, de motorkracht op een auto of de afzetkracht van de wielen op de weg, de opwaartse kracht op een drijvend voorwerp, de windkracht in de zeilen van een boot enzovoort. In het algemeen gelden de volgende twee regels:

- voor de beweging van het zwaartepunt mag je alle uitwendige krachten laten aangrijpen in het zwaartepunt;
- voor de beweging ten opzichte van het zwaartepunt heeft iedere kracht een eigen aangrijpingspunt.

Kracht en druk

Als instapprobleem voor het begrip *druk* kan gebruik gemaakt worden van situaties waarin voorwerpen of voertuigen wegzakken in de ondergrond. Praktijkvoorbeelden zijn rupsbanden van tanks, plankjes onder een steigerpaal, brede banden van een tractor en naaldhakken. Een bruikbaar laboratoriumvoorbeeld is het leggen van bakstenen op een dikke laag schuimrubber.

Als duidelijk is geworden dat het indrukken van de ondergrond niet alleen afhangt van de kracht maar ook van het oppervlak, kan de formule $p = F/A$ worden geïntroduceerd. Als verwerking kunnen andere praktijkvoorbeelden worden besproken, zoals de punaise en het mes.

Hefbomen en balansen

De mogelijke leerlingdenkbeelden rond evenwicht bij een balans zijn samengevat in figuur 221.

Leerlingdenkbeelden

- Bij elke balans moeten de krachten links en rechts van het draaipunt even groot zijn voor evenwicht.

Figuur 221 – Mogelijke leerlingdenkbeelden rond het evenwicht bij een balans.

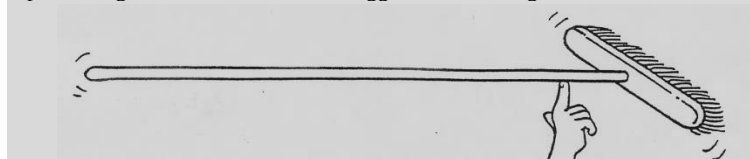
Een eerste toepassing van krachten in gebruiksvoorwerpen is het gebruik van een hefboom zoals in figuur 222. De kracht op de hefboom wordt vergroot overgebracht op de kast. Hierbij zijn drie punten van belang: het aangrijpingspunt van de kracht op de hefboom, het draaipunt van de hefboom en het aangrijpingspunt van de kracht op de last. De hefboomregel luidt: kracht maal arm is gelijk aan last maal arm. Realiseer je wel dat de eerste kracht op de hefboom werkt, en de tweede kracht op de kast. Hier mag je dus niet spreken van actiekracht en reactiekracht, want het gaat niet om een krachtenpaar in een contactpunt.

Een tweede praktijktoepassing van krachten is de (ongelijkarmige) balans. Een goed voorbeeld is de spoorboom met een contragewicht. Wat betreft draaiing zijn de zwaartekrachten op het contragewicht en de boom (beide aangrijpend in het zwaartepunt van deze onderdelen) in evenwicht. Hier geldt de balansregel: het krachtmoment linksom is gelijk aan het krachtmoment rechtsom. Hefbomen en balansen (en ook katrollen) zijn voorbeelden van situaties met krachten die in evenwicht zijn.

Een mooie manier om het in figuur 221 genoemde leerlingdenkbeeld naar boven te halen is de demonstratie 'Bezem in balans' van figuur 224.

Lespraktijk

De leraar laat zien hoe je een bezem op één vinger kunt laten balanceren door de bezem op een vinger van beide handen te leggen en deze langzaam naar elkaar toe te bewegen.



Hij legt dan de leerlingen de volgende vraag voor: "Nu ga ik de bezem doorzagen op de plaats van het steunpunt. Welk stuk zal daarna dan het zwaarst zijn: het stuk links (het

grootste deel van de steel), het stuk rechts (het stukje steel met het veeggedeelte), of zijn beide stukken even zwaar?”

De leraar laat de leerlingen individueel nadenken over hun antwoord en de antwoorden in twee- of drietallen uitwisselen. Daarna peilt hij klassikaal de meningen. Op basis van de intuïtieve ideeën van leerlingen over evenwicht valt te verwachten dat er een grote voorkeur bestaat voor het laatste antwoordalternatief: beide stukken zijn even zwaar. Daarna zaagt de leraar de bezem door op de plaats van het steunpunt, laat leerlingen de zwaarte van de twee stukken vergelijken (of weegt beide stukken met een weegschaal) en identificeert het juiste antwoordalternatief (of laat leerlingen dat doen). Het verschil tussen het juiste en het door de leerlingen in meerderheid gekozen antwoordalternatief vormt een aanleiding om eens goed te gaan kijken hoe het nu precies zit met dit soort evenwichtssituaties. Dus: aanleiding voor de behandeling van krachtmomenten en de momentenstelling, met uiteindelijk als afsluiting daarvan de uitleg van de gepresenteerde probleemsituatie.

De demonstratie kost in opeenvolgende schooljaren in een aantal parallelklassen veel bezems. De leraar voorkomt dat door het gebruik van een geprepareerde bezem: hij zaagt de bezem vooraf door in het zwaartepunt en zet de beide delen weer aan elkaar vast met een stuk schroefdraad.

Figuur 224 – Voorbeeld van een demonstratie gericht op het oproepen van een leerlingdenkbeeld als motivering voor de behandeling van de nieuwe leerstof.

Krachten op voorwerpen in rust

De mogelijke leerlingdenkbeelden rond krachten op voorwerpen in rust zijn samengevat in figuur 225.

Leerlingdenkbeelden

- Op een voorwerp op een tafel werkt alleen de zwaartekracht, de tafel verhindert het vallen.
- De zwaartekracht op een voorwerp moet groter zijn dan de kracht van de ondergrond op het voorwerp (ofwel de normaalkracht), anders zal het voorwerp gaan zweven.
- Op een voorwerp in contact met de Aarde werkt geen zwaartekracht meer.
- Op een voorwerp in rust werken geen krachten.
- Voorwerpen waarop even grote maar tegengesteld gerichte krachten werken, staan stil.
- Wrijving tussen twee voorwerpen werkt maar op één van die voorwerpen: het voorwerp waarop een kracht wordt uitgeoefend.

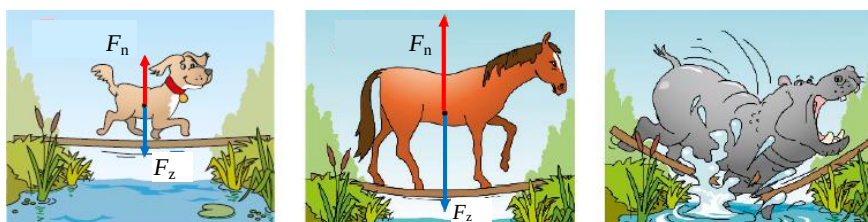
Figuur 225 – Mogelijke leerlingdenkbeelden rond krachten op voorwerpen in rust.

In het derde leerjaar wordt vaak gekeken naar een evenwicht van krachten als een voorwerp in rust is. Je kunt denken aan een voorwerp dat op een tafel staat, een voorwerp dat aan een touw hangt of een voorwerp waar je tevergeefs aan trekt in verband met de wrijving met het grondoppervlak. Fysisch gezien gaat het om een evenwicht tussen zwaartekracht en normaalkracht, tussen zwaartekracht en spankracht, en tussen trekkracht en wrijvingskracht. Maar leerlingen hebben deze nieuwe begrippen niet nodig om de situatie te begrijpen. Voor hen is het vanzelfsprekend dat een voorwerp niet door een tafel zakt (tenzij de tafel het begeeft), dat een voorwerp aan een touw blijft hangen (tenzij het touw breekt) en dat een voorwerp in beweging komt als de trekkracht de wrijvingskracht overwint. Vanuit zichzelf hebben leerlingen geen behoefte aan een verklaring met behulp van evenwicht van krachten. Hier moeten we te hulp komen met wat we ‘brugvoorbeelden’ kunnen noemen: de laboratoriumsituatie in een drieluik (zie paragraaf 2.3.1).

Normaalkracht – Een instapprobleem voor het begrip *normaalkracht* is een tekening van een plank met een gewicht over een sloot, waarbij de plank iets doorzakt maar niet breekt. De vraag is: “Waarom wordt er een evenwichtsstand bereikt bij een bepaald gewicht?”

Dit kun je goed laten zien met een gewicht op een latje dat doorbuigt. Als je het gewicht optilt, veert het latje omhoog. Je kunt de veerkracht ook voelen. Als je het latje naar beneden duwt, buigt het verder door. Maar als je je hand weer weghaalt, gaat het latje terug naar de evenwichtsstand. Hoe zwaarder het gewicht is, des te groter is de doorbuiging en des te groter is de tegenwerkende veerkracht. Je mag de normaalkracht op een voorwerp dat op tafel ligt voorstellen als

de tegenwerkende veerkracht van een plank, ook al zie je de tafel niet doorbuigen. Zwaartekracht en normaalkracht zijn kracht en tegenkracht die beide op het voorwerp werken. Als het voorwerp te zwaar wordt, breekt de plank.



Figuur 226 – Het doorbuigen van een plank over een sloot. Links: een kleine zwaartekracht F_z , dus een kleine normaalkracht F_n . Midden: een grotere zwaartekracht, dus een grotere normaalkracht. Rechts: een te grote zwaartekracht, de plank breekt. Bron: *Overall NaSk 1-2 vmbo-kgt, Leerboek (5^e editie, pg. 124).*

Spankracht – Eenzelfde verhaal geldt voor de spankracht in een touw, die je mag vergelijken met de veerkracht in een elastiekje (ook al rekt het elastiek wel uit en zie je dat niet voor het touw): zie het drieluik van figuur 227.

Drieluik: De bergbeklimmer

Praktijksituatie



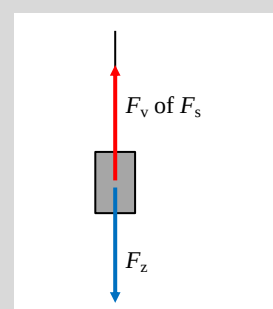
Na een val hangt de bergbeklimmer gelukkig nog aan het touw. Het touw is strak gespannen en uitgerekt.

Laboratoriumsituatie



Bij een gewicht rekt het elastiek uit, totdat de veerkracht even groot is als de zwaartekracht op het voorwerp.

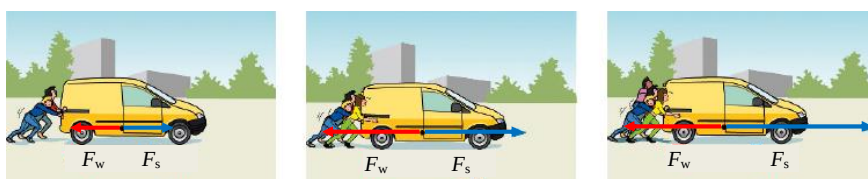
Theoriesituatie



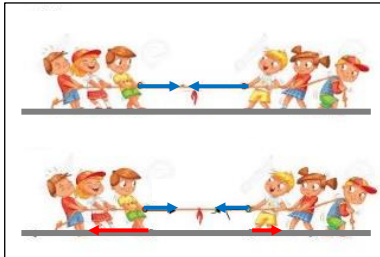
Op een voorwerp dat stil hangt aan een elastiek werken twee even grote krachten: de zwaartekracht F_z en de veerkracht F_v . Voor een voorwerp dat stil hangt aan een touw geldt hetzelfde: de zwaartekracht F_z en de spankracht F_s zijn even groot.

Figuur 227 – Een drieluik voor het begrip veerkracht of spankracht en krachtenevenwicht.

Wrijvingskracht – Het derde voorbeeld betreft een auto die voortgeduwd wordt, zoals in figuur 228. Zolang de (maximale) wrijvingskracht groot genoeg is, beweegt de auto niet. De wrijvingskracht wordt steeds groter bij toenemende duwkracht – totdat de duwkracht groter wordt dan de (maximale) wrijvingskracht en de duwkracht de wrijvingskracht overwint.



Figuur 228 – Voortduwen van een auto. Links: bij een kleine spierkracht F_s is de wrijvingskracht F_w ook klein. Midden: bij een grotere spierkracht is de wrijvingskracht ook groter. Rechts: als de wrijvingskracht maximaal is en je duwt nog harder, komt de auto in beweging. Bron: *Overall NaSk 1-2 vmbo-kgt, Leerboek (5^e editie, pg. 124).*



Figuur 229 – Voorstelling van de krachten bij touwtrekken. Boven: onjuist. Onder: juist.

Aandachtspunten – De normaalkracht, spankracht en wrijvingskracht worden *tegenkrachten* genoemd. Tegenkrachten werken op hetzelfde voorwerp als de kracht. Als het gewicht, de trekkracht of de duwkracht groter worden, passen de normaalkracht, spankracht en wrijvingskracht zich bij stilstand aan tot een maximale waarde. Dat is de breekgrens voor een ondergrond of een touw, en de schuifgrens voor een voorwerp waaraan wordt getrokken. Deze kracht en tegenkracht zijn iets geheel anders dan actiekracht en reactiekracht. Bij dat laatste gaat het over de wisselwerking tussen twee voorwerpen, waarbij de actie- en reactiekracht altijd even groot zijn en op verschillende voorwerpen werken.

Een situatie waarin het krachtenevenwicht vaak verkeerd wordt beoordeeld is het touwtrekken zoals in figuur 229. De pijlen geven de kracht aan die de ene groep uitoefent op de ander groep via het touw. Neem aan dat de kinderen links winnen. Je mag dan niet zeggen dat de kinderen links een grotere kracht op de kinderen rechts uitoefenen, dan de kinderen rechts op de kinderen links (zie de bovenste figuur). Dat zijn immers actiekracht en reactiekracht die ongeacht de beweging even groot zijn. Voor een goed begrip moet je naar het systeem als geheel kijken. De afzetkracht van de kinderen links is – als zij winnen – groter dan de afzetkracht van de kinderen rechts. De wisselwerking via het touw heeft even grote krachten (zie de onderste figuur).

Krachten op voorwerpen in beweging

De mogelijke leerlingdenkbeelden rond krachten op voorwerpen in beweging zijn samengevat in figuur 230.

Leerlingdenkbeelden

- Als je een voorwerp duwt of gooit, geef je het een kracht mee die langzaam wordt ‘opgebruikt’ als de snelheid minder wordt. Als de kracht op is, stopt het voorwerp.
- Als op een voorwerp geen krachten werken, staat het stil of komt het tot stilstand.
- Voorwerpen waarop even grote maar tegengestelde krachten werken, staan stil.
- Om een voorwerp in beweging te houden is een kracht nodig, of ten minste een kracht groter dan een tegenwerkende kracht als de wrijving.
- Een grotere kracht geeft een grotere snelheid. Kracht en snelheid zijn (min of meer) evenredig: $v \sim F$.
- De som van krachten (bijvoorbeeld de som van de achterwaartse krachten op een fiets: lucht- en rolweerstand) wordt als een aparte kracht gezien.

Figuur 230 – Mogelijke leerlingdenkbeelden rond krachten op voorwerpen in beweging.

In het derde en vierde leerjaar wordt vaak gekeken naar de krachten op een voorwerp en de beweging die ze veroorzaken: versnellen (of optrekken), rijden met een constante snelheid en vertragen (of remmen). Als instaprobleem kunnen we de situatie gebruiken van een fietser die met een snelheid van 20 km/h fietst, dan maximale kracht zet en blijft zetten, maar toch niet verder komt dan een snelheid van 30 km/h. De vraag is: “Hoe kun je dit begrijpen met behulp van krachten?”

Voor een goede uitleg is allereerst veel aandacht nodig voor het benoemen van de krachten die in deze situatie werken.

- De spierkracht wordt via trappers, ketting en achterwiel overgebracht naar het contactpunt van achterband en wegdek. De band zet zich af tegen het wegdek. Als er voldoende wrijving is, betekent dat een *voorwaartse kracht* op de fiets. Het aangrijpingspunt van de voorwaartse kracht is het contactpunt van de achterband en het wegdek, maar voor het gemak tekenen we die kracht vanuit het midden van de fietser, horizontaal en voorwaarts gericht. Als een fietser meer kracht op de trappers zet, wordt deze kracht groter.
- Er is sprake van een aantal achterwaartse krachten, die samen een tegenkracht vormen: de *luchtweerstand*, de *rolweerstand*, de *wrijving in de draaiende onderdelen* van de fiets en de *remkracht*.

Allereerst de luchtweerstand. Door het fietsen moet je door de lucht heen bewegen, en voel je een weerstandskracht alsof je tegenwind hebt met een snelheid die gelijk is aan de snelheid waarmee je fietst. Als je in elkaar duikt, gaat het fietsen gemakkelijker. Tegenwind maakt fietsen moeilijker, wind mee maakt het fietsen gemakkelijker.

Vervolgens is er de rolweerstand van band en wegdek. Door het voortdurend in- en uitdeuken van band en wegdek gaat er energie verloren. Dit merkt de fietser als een tegenwerkende kracht: rij maar eens met zachte banden of op een zacht wegooppervlak (zoals een zandpad). Hoewel de kracht aangrijpt in het contactpunt van band en wegdek, tekenen we die kracht weer vanuit het midden van de fietser.

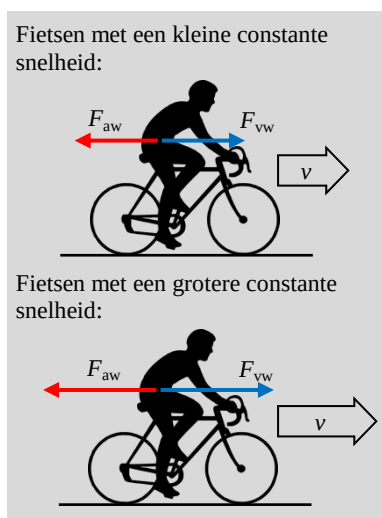
Als derde achterwaartse kracht is er een wrijvingskracht in de draaiende onderdelen van de fiets: de trappers, de ketting en de wielen. Die wordt meestal opgeteld bij de rolweerstand.

En tot slot is er de remkracht. Door je remmen te gebruiken, zorg je voor een extra achterwaartse kracht. Ook deze kracht tekenen we weer vanaf het midden van de fietser.

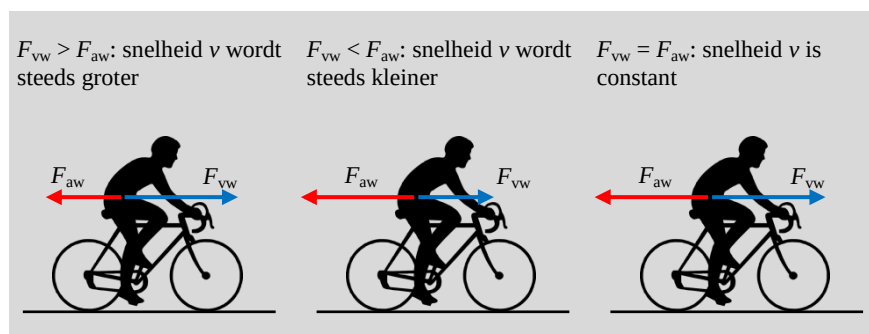
- Ook in de verticale richting zijn er krachten: de zwaartekracht en de normaalkracht. Deze heffen elkaar op.

Je beschouwt eerst de situatie waarin er geen evenwicht van krachten is in de horizontale richting (zie figuur 231). De voorwaartse kracht wordt vaak de kracht genoemd, en de achterwaartse kracht de tegenkracht.

- Als de kracht groter is dan de tegenkracht, zal het voorwerp versnellen: de fiets trekt op vanuit stilstand of versnelt vanuit fietsen met constante snelheid.
- Als de tegenkracht groter is dan de kracht, zal de fiets vertragen: de fiets rijdt uit of remt af tot stilstand.
- Dan moet de snelheid van de fiets wel constant zijn als de kracht en de tegenkracht even groot zijn... hoe gek dit ook lijkt.



Figuur 232 – Krachtenevenwicht bij fietsen met een constante snelheid: bij een grotere snelheid is de achterwaartse kracht (de luchtweerstand) groter, en is dus ook de voorwaartse kracht groter.



Figuur 231 – Vanuit twee voorstelbare situaties zonder krachtenevenwicht naar een voor leerlingen problematische situatie van krachtenevenwicht bij een constante snelheid.

Aandachtspunten – Maar hoe zit het dan met het leerlingdenkbeeld uit figuur 230 dat een grotere kracht een grotere snelheid geeft, en dat kracht en snelheid (min of meer) evenredig zijn?

Dat idee is bij leerlingen ontstaan door hun dagelijkse ervaring met fietsen, waarbij ze alleen de voorwaartse kracht ‘voelen’ (in termen van de kracht die op de trappers moet worden uitgeoefend). En als je alleen naar de voorwaartse kracht kijkt, dan klopt dat idee. Bij fietsen met een kleine constante snelheid is de voorwaartse kracht even groot als de achterwaartse kracht, waarbij we voor die achterwaartse kracht voor het gemak even alleen maar de luchtweerstand nemen. Bij fietsen met een grotere constante snelheid is de voorwaartse kracht weer even groot als de achterwaartse kracht. Maar omdat die achterwaartse kracht (de luchtweerstand) door de grotere snelheid groter is geworden, is ook de voorwaartse kracht groter dan in de situatie van fietsen met een kleine constante snelheid (zie figuur 232).

Het op dagelijkse ervaringen gebaseerde leerlingdenkbeeld dat voor fietsen met een grotere (constante) snelheid een grotere kracht nodig is, is dus niet fout. Alleen is de verklaring van dat verschijnsel wat ingewikkelder dan de leerlingen in eerste instantie geneigd zijn te denken. Met het drieluik van figuur 233 over de parachutespringer en een bijbehorende ‘invulopgave’ als die van figuur 234 kan bij leerlingen het idee van constante snelheid bij krachtenevenwicht verder worden versterkt.

Drieluik: De parachutespringer

Praktijksituatie



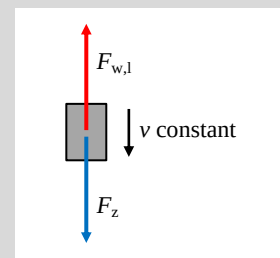
Als de parachute open is, valt de parachutespringer met een constante snelheid naar beneden.

Laboratoriumsituatie



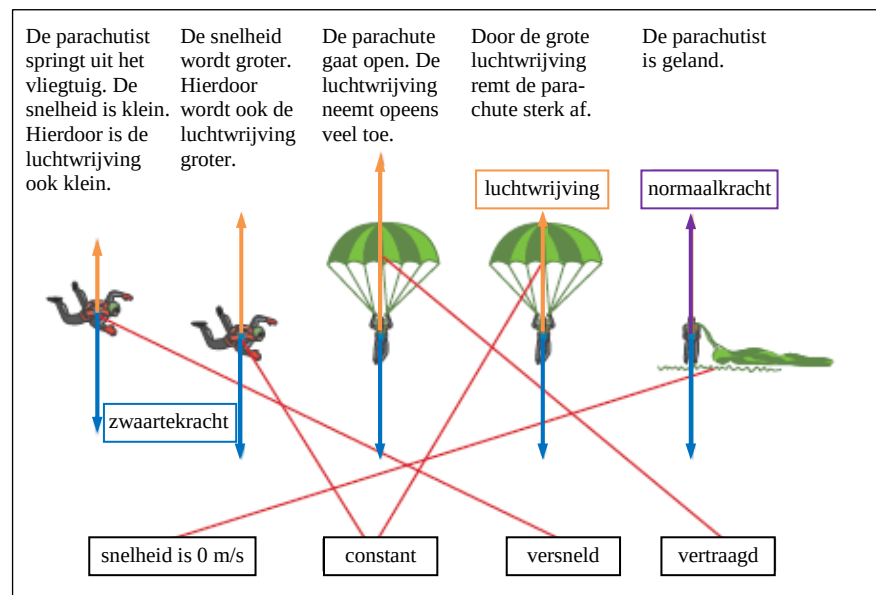
Je kunt een eenvoudige parachute maken van papier, dun draad en plakband. De parachute valt met een constante snelheid naar beneden.

Theoriesituatie

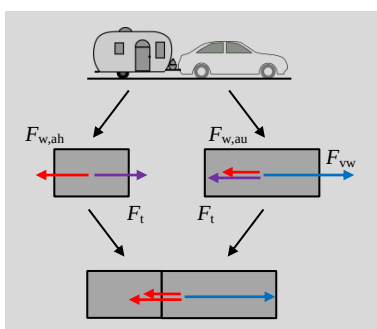


Op een voorwerp dat in lucht naar beneden valt, werkt de zwaartekracht F_z omlaag en een tegenwerkende kracht $F_{w,l}$ als gevolg van de luchtweerstand omhoog. Zodra deze krachten even groot zijn, is de snelheid constant.

Figuur 233 – Een drieluik voor het begrip krachterevenwicht bij constante snelheid.



Figuur 234 – Voorbeeld van een koppelvraag over de beweging onder invloed van een snelheidsafhankelijke luchtweerstandskracht.



Figuur 235 – De krachten op de beide deelsystemen (midden) en op het systeem als geheel (onder).

Krachten op systemen en deelsystemen

In het vierde leerjaar gaan leerlingen redeneren met behulp van systemen en deelsystemen. Als instapprobleem kan dienen het trekken van een aanhanger met een auto. De vraag is: “Welke krachten werken op de aanhanger en welke op de auto als je optrekt? En komt dit overeen met $F = m \cdot a$ voor het systeem en voor elk van de deelsystemen?”

Op het systeem als geheel werken een voorwaartse kracht (de motorkracht) en twee achterwaartse krachten (de luchtweerstand op de aanhanger en de luchtweerstand op de auto). Als de nettokracht groter is dan nul, is de beweging versneld. Er geldt: $F_{\text{netto}} = (m_{\text{au}} + m_{\text{ah}}) \cdot a$.

Om de krachten op de aanhanger en de auto afzonderlijk te weten, moet je de spankracht/trekkkracht F_t kennen in de verbindingstang tussen auto en aanhanger (zie figuur 235). Volgens de derde wet van Newton geldt dat actiekracht en reactiekracht gelijk zijn, ongeacht de beweging van de auto en de aanhanger. Dus: de trekkkracht van de auto op de aanhanger is altijd even groot als de trek-

kracht van de aanhanger op de auto (maar, uiteraard, tegengesteld gericht).

Als de aanhanger versnelt, dan moet gelden: $F_t > F_{w,ah}$. Als de auto versnelt, dan moet gelden: $F_{vw} > F_t + F_{w,au}$. Als de auto en de aanhanger met constante snelheid rijden, dan wordt het teken ‘groter dan’ vervangen door het teken ‘is gelijk aan’. Of, met andere woorden: voor beide deelsystemen (aanhanger en auto) geldt dat kracht en tegenkracht op het deelsysteem even groot zijn. En ten slotte: als de auto en de aanhanger vertragen, dan wordt het teken ‘groter dan’ vervangen door het teken ‘kleiner dan’.

Voor het systeem als geheel (auto met aanhanger) geldt dat er geen rekening gehouden hoeft te worden met de ‘interne krachten’ die de twee deelsystemen op elkaar uitoefenen: de trekkracht. Dus: F_{vw} is groter dan, gelijk aan en kleiner dan $F_{w,au} + F_{w,ah}$ bij respectievelijk versnellen, rijden met constante snelheid en vertragen.

Wetten van Newton

De drie door Isaac Newton in 1687 in zijn *Principia* geformuleerde wetmatigheden vormen de grondslag van de klassieke mechanica. Ze zijn ook meestal in iets andere bewoordingen de basis voor het natuurkundeonderwijs.

Eerste wet: de traagheidsregel – Een voor het natuurkundeonderwijs geschikte formulering van de eerste wet van Newton (de traagheidsregel) is: “De ongedwongen beweging van een voorwerp is rust of een rechtlijnige beweging met constante snelheid. Hiervoor is geen verklaring nodig met krachten als oorzaak van bewegingsverandering. Voor een gedwongen beweging is een verklaring van de soort beweging te vinden met behulp van krachten als oorzaak van bewegingsverandering.”

Historisch gezien is van belang dat men dacht dat voor de cirkelbewegingen in het zonnestelsel geen verklaring nodig is met krachten als oorzaak van bewegingsverandering, en dat voor de valbeweging op aarde geen verklaring nodig is vanwege het natuurlijke karakter van die beweging. Onbegrijpelijk bleef daarvoor de kogelbaan. Tegenwoordig gebruiken we de gravitatiekracht als verklaring voor de beweging van de planeten en de maan (de gravitatiekracht doet dienst als middelpuntzoekende kracht) en de zwaartekracht als verklaring voor de (eenparig versnelde) valbeweging. De kogelbaan zien we als een combinatie van een eenparig versnelde verticale beweging (als gevolg van de zwaartekracht) en een eenparige horizontale beweging.

Aandachtspunten – Voor leerlingen is het erg moeilijk om de rechtlijnige beweging met constante snelheid te zien als een beweging waarvoor geen verklaring met krachten nodig is. Voor het realiseren van een ongedwongen eenparige rechtlijnige beweging is ingewikkelde apparatuur zoals een luchtkussenbaan nodig. De eenparige rechtlijnige beweging van een fiets, auto of slee is altijd een situatie met een voorwaartse kracht die goed herkenbaar is (trapkracht, motorkracht, trekkracht) en een achterwaartse kracht die verborgen is en zich aanpast aan de situatie (rolweerstand, schuifweerstand, luchtweerstand). Vanuit de dagelijkse ervaring is de voorwaartse kracht evenredig met de snelheid (wat globaal klopt), en alleen als er veel aandacht wordt besteed aan de weerstand als achterwaartse kracht kunnen leerlingen van dit idee afstappen.

Dit betekent dat je op twee manieren rust of een beweging met constante snelheid kunt krijgen.

- De ongedwongen beweging. Dit komt voor bij bewegingen zonder wrijving zoals in de ruimte, op een luchtkussenbaan of op een ijsvlakte.
- De gedwongen beweging. Dit komt voor als kracht en tegenkracht even groot zijn, dus als de nettokracht gelijk is aan nul zoals het geval is bij voertuigen die met constante snelheid rijden.

Tweede wet: de versnellingsregel – In het natuurkundeonderwijs wordt de tweede wet van Newton (de versnellingsregel) meestal als volgt geformuleerd: een voorwerp krijgt een versnelling die evenredig is met de nettokracht die op het voorwerp werkt en die omgekeerd evenredig is met de massa van het voorwerp. In formule: $F_{\text{netto}} = m \cdot a$.

Een voorwerp krijgt dus een versnelling of vertraging als er een nettokracht

Luchtkussenbaan

Het zal duidelijk zijn dat het met bijvoorbeeld een luchtkussenbaan meten van de kwantitatieve regel $F = m \cdot a$ slechts zeer gedeeltelijk kan bijdragen aan begripsvorming rond de tweede wet van Newton. Hierbij wordt er ten onrechte van uitgegaan dat leerlingen de situatie met een voorwaartse kracht en zonder wrijvingskracht kunnen vertalen naar situaties waar het gaat om het evenwicht tussen voorwaartse en achterwaartse kracht.



Andere, meer begripsvormende activiteiten met de luchtkussenbaan zijn: hoe vaak kan een glijder heen en weer bewegen na een zet, hoe verandert dit als je er een kartonnetje op zet (meer luchtweerstand) en een groter kartonnetje (nog meer luchtweerstand), en kunnen we evenwicht maken tussen de trekkracht en de luchtweerstand? Interessante experimenten zijn ook: het voorttrekken van de glijder met een constante kracht zoals die van een slap elastiek, of het plaatsen van een kleine elektromotor met propeller op de glijder van de luchtkussenbaan.

Figuur 237 – De luchtkussenbaan en de tweede wet van Newton.

op werkt. De beweging is dan gedwongen. Kracht en tegenkracht zijn verschillend van grootte, en de nettokracht is niet gelijk aan nul. Bij een met constante snelheid bewegend voorwerp op aarde is meestal sprake van een gedwongen beweging. Kracht en tegenkracht zijn dan even groot en de nettokracht is gelijk aan nul.

We stellen voor om de tweede wet van Newton (de versnellingsregel) te introduceren vanuit het idee van een evenwichtssituatie, en het feit of er wel of geen evenwicht van krachten is.



Figuur 236 – Praktijk-, laboratorium- en theoriesituatie bij de versnelde beweging.

Beschouw een voorwerp dat beweegt langs een rechte lijn in het horizontale vlak. Als de voorwaartse kracht groter is dan de achterwaartse kracht, is er een versnelling van de beweging. Als de achterwaartse kracht groter is dan de voorwaartse kracht (bijvoorbeeld bij het wegvallen van de voorwaartse kracht), dan is er een vertraging van de beweging. En dan: wat als beide krachten even groot zijn? Dan kan het niet anders of de snelheid is dan constant, hoe gek dat ook lijkt.

We stellen voor om de massa te introduceren als (zware) massa zonder het verschil tussen zware en trage massa voor leerlingen te problematiseren. Vanuit de zwaartekrachtsregel is de zwaartekrachtsconstante g dan $9,81 \text{ N/kg}$. Later, als de valbeweging zonder wrijving wordt geanalyseerd, kan uit de versnellingsregel worden afgeleid dat de zwaartekrachtsconstante gelijk is aan de zwaartekrachtsversnelling van $9,81 \text{ m/s}^2$.

Aandachtspunten – Wat verstaan we onder traagheid? Voortbouwend op het dagelijks taalgebruik kun je zeggen dat een voorwerp traag is omdat het een tijdje duurt voordat een voorwerp van snelheid verandert. Maar dit is de inhoud van de tweede wet! In de eerste wet is ‘volharden’ wellicht een beter woord dan traagheid. Als er geen kracht werkt, dan volhardt een voorwerp in zijn bewegingstoestand, wat wil zeggen dat het in dezelfde richting met dezelfde snelheid blijft bewegen.

Omvat de tweede wet de eerste wet? Veel leraren zeggen dat de eerste wet volgt uit de tweede: $F_{\text{netto}} = 0$, dus $a = 0$, dus $v = \text{constant}$. Newton vond het nodig om de eerste wet apart te formuleren, los van de tweede wet. Met de eerste wet benadrukt hij dat een natuurlijke beweging zonder krachtwerking niet een cirkelbeweging is, maar een rechte lijnige beweging met constante snelheid. In de tweede wet geeft hij aan dat de gedwongen beweging voldoet aan de versnellingsregel $F_{\text{netto}} = m \cdot a$. Hieruit volgt dat de snelheid constant is van richting en grootte als geldt $F_{\text{netto}} = 0$.

Wat is het verschil tussen trage en zware massa? Voor leerlingen in de onderbouw is het erg moeilijk te begrijpen dat de zwaartekrachtsconstante ($9,81 \text{ N/kg}$) gelijk is aan de zwaartekrachtsversnelling ($9,81 \text{ m/s}^2$). In de tweede klas hanteren we bij voorkeur $9,81 \text{ N/kg}$, omdat dat ook te begrijpen is zonder de tweede wet van Newton. Eigenlijk stuiten we hier op een fundamenteel natuurkundig probleem: waarom is de zware massa (uit de gravitatiewet) gelijk aan de trage massa (uit de tweede wet van Newton)? Voor leerlingen moeten we dit niet problematiseren, want het antwoord ligt diep verscholen in het equivalentieprincipe zoals geformuleerd in de algemene relativiteitstheorie.

Derde wet: de wisselwerkingsregel – De wisselwerking tussen twee voorwerpen wordt beschreven met een krachtenpaar, aangrijpend op de verschillende

voorwerpen: de actiekracht en de reactiekracht. De wisselwerkingskrachten zijn even groot en tegengesteld gericht, ongeacht de grootte, de vorm of de bewegingstoestand van de voorwerpen.

Bij de introductie van de derde wet van Newton (de wisselwerkingsregel) is het belangrijk om onderscheid te maken tussen actie- en reactiekracht (de wisselwerkingskrachten) en kracht en tegenkracht. De wisselwerkingskrachten tussen twee deelsystemen grijpen aan op verschillende voorwerpen. Dat betekent dat ze niet in evenwicht kunnen zijn, want ze werken op verschillende voorwerpen. Bijzonder is dat de wisselwerkingskrachten gelijk en tegengesteld gericht zijn, ongeacht de grootte en de vorm van de wisselwerkende voorwerpen en ongeacht de bewegingstoestand van de beide voorwerpen.

Aandachtspunten – Om aan te sluiten bij het dagelijks taalgebruik, kun je voor contactkrachten vaak onderscheid maken tussen actiekracht (als actieve oorzaak) en reactiekracht (als passief gevolg). Bij krachten op afstand is het meestal niet mogelijk om een dergelijk onderscheid te maken. Denk aan de krachten op afstand zoals de aantrekkingskracht tussen twee magneten, of tussen twee hemellichamen. Ten gevolge van de gravitatie trekt de aarde de maan aan, maar ook de maan de aarde, en wel met dezelfde kracht.

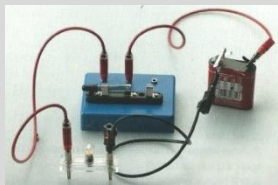
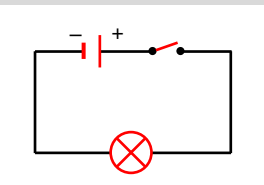
Kracht en tegenkracht werken op hetzelfde voorwerp en zorgen samen voor de nettokracht op een voorwerp. In situaties van rust zijn deze krachten even groot. Voorbeelden zijn de zwaartekracht en de normaalkracht op een staand voorwerp, de zwaartekracht en de spankracht op een hangend voorwerp, en de voorwaartse kracht en de schuifwrijvingskracht op een stilstaand voorwerp. Is de kracht te groot, dan breken ondergrond of touw, of gaat een voorwerp schuiven. Duw je bijvoorbeeld tegen een muur dan wordt deze een heel klein beetje ingedrukt, zodat het geheel in rust blijft.

6.4 Elektrische schakelingen

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 paragraaf 6.2). In deze paragraaf gaan we na welke denkbeelden de leerlingen over elektrische schakelingen hebben, welke overgangen in het denken gemaakt moeten worden, en hoe 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 238 weergegeven in de vorm van een drieluik.

Drieluik: De schemerlamp		
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.

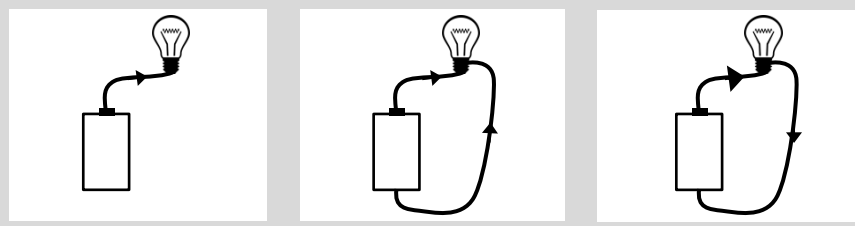
Figuur 238 – Een drieluik rond het begrip stroomkring. Het drieluik voor de zaklamp ziet er vergelijkbaar uit.

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.

Leerlingdenkbeelden

Leerlingen hebben vaak andere denkbeelden over een stroomkring, zoals weergegeven in de drie figuren hieronder.

- Voor een brandend lampje is één draad van de batterij naar het lampje voldoende (links).
- Er zijn twee stromen die botsen bij het lampje (midden).
- De stroom vóór het lampje is groter dan na het lampje, ofwel: er is sprake van stroomverbruik (rechts).



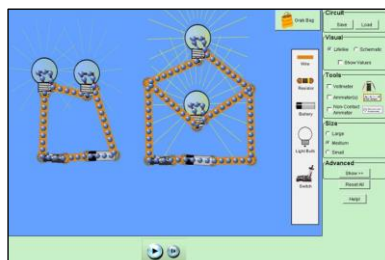
Figuur 239 – Leerlingdenkbeelden over de stroomkring.

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 dat 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.

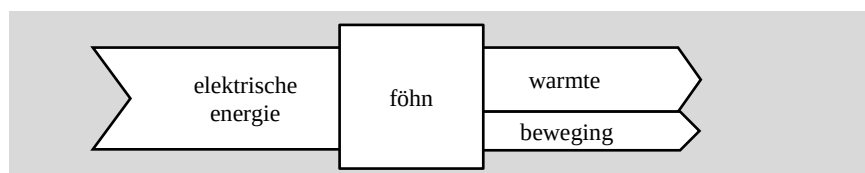
Computersimulatie – Op de website van de [University of Colorado](#) vind je verschillende simulaties, waaronder die van de stroomkring. Deze maken de stroom goed voor te stellen.



Figuur 240 – 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 241 – Schematische voorstelling van een energieomzetting: het energiestroomdiagram.

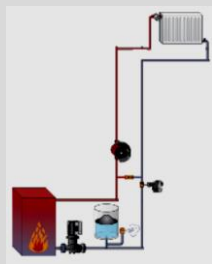
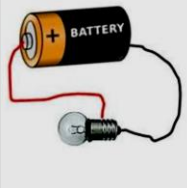
Leerlingdenkbeelden

- In een elektrische schakeling is sprake van stroomverbruik in plaats van energieverbruik.

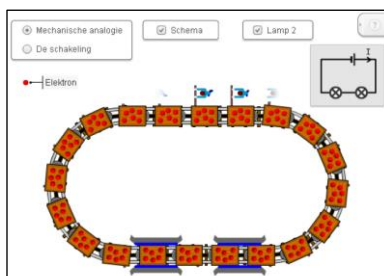
Figuur 242 – Leerlingdenkbeelden over stroom en energie.

De vakregel die hier van toepassing is heet de *energiereg*: 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.

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 243 – Een vergelijking tussen de centrale verwarming en de elektrische stroomkring.



Figuur 244 – Een computersimulatie met een mechanische analogie. Bron: [Edumedia](#) > elektrisch netwerk > mechanische analogie.

Een andere veelgebruikte analogie is die van met volle en lege rugzakken rondlopende mannetjes. Hiervoor worden ook wel treinwagons 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 244 duwen de mannen de karren voort en geven energie mee aan de karren. Door wrijving wordt de beweging van de karren tegengewerkt en ontstaat er warmte.

Stroomregel

In het tweede leerjaar wordt veelal een 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.

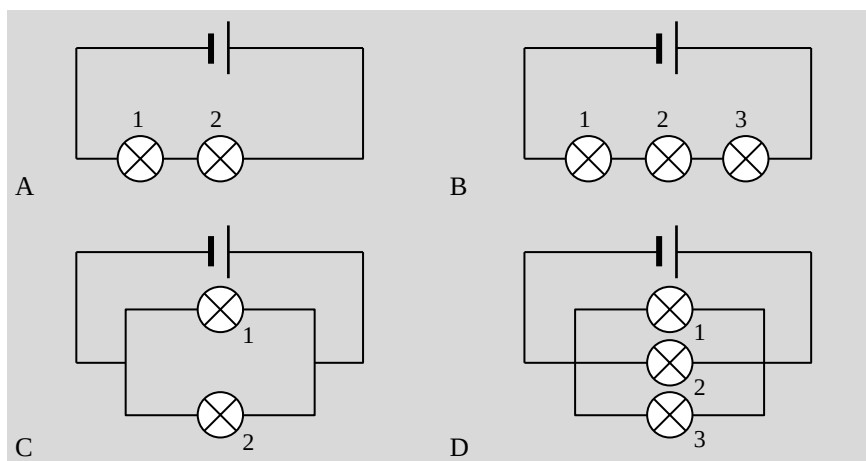
De vier schakelingen van figuur 245 vormen een instapprobleem om leerlingdenkbeelden te inventariseren. De opdrachten bij deze schakelingen zijn: “Vergelijk de felheid waarmee de lampjes branden met een lampje dat brandt met de normale lichtsterkte” en “Bedenk wat er gebeurt als je een lampje losdraait.”

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.

Leerlingdenkbeelden

- Spanning, stroom en energie worden niet (goed) van elkaar onderscheiden: spanning is hetzelfde als stroom, en stroom is hetzelfde als energie.
- Een spanningsbron levert een constante stroom: bij een verandering van de weerstand in een schakeling blijft de spanningsbron dezelfde stroom leveren.

Figuur 246 – Leerlingdenkbeelden over spanning en stroom.



Figuur 245 – De schakelingen bij het instapprobleem voor serie- en parallelschakeling.

Bij het redeneren in met het instapprobleem vergelijkbare situaties helpen de volgende regels.

- In een serieschakeling is de stroom overall 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 evenwichtsbalk 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 (weerstand) parallel is veel eerder klaar dan het groepje met één bank (weerstand) en die weer eerder dan het groepje met twee banken (weerstand) in serie.

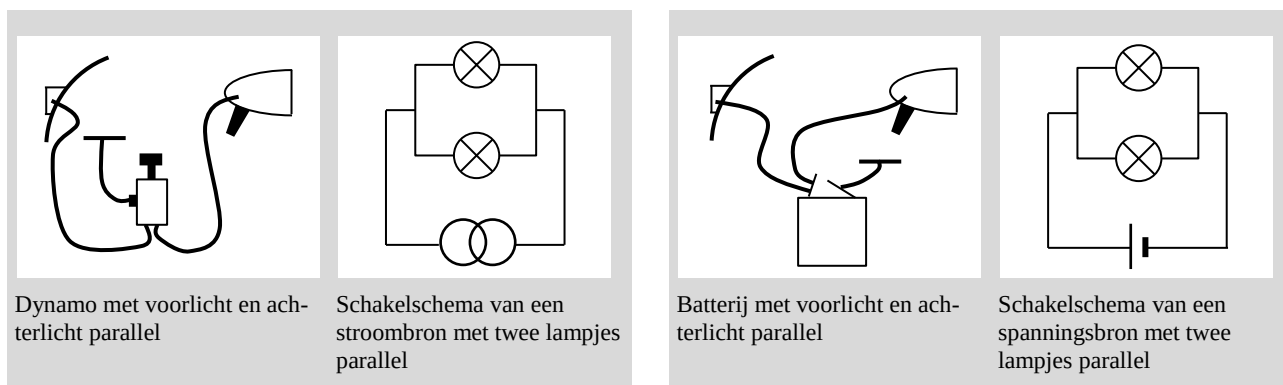
De twee situaties van figuur 247 geven een aardige, maar moeilijke verwerking van de leerstof. De oplossing voor dit probleem vind je door onderscheid te maken tussen een spanningsbron en een stroombron.

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?

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



Figuur 247 – Twee situaties voor verwerking van de leerstof over serie- en parallelschakeling.

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. De aanbeveling is: maak bij stroomsterkte een duidelijk onderscheid tussen debiet en stroomsnelheid.

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. De eenheid ampère is zo'n $6,3 \cdot 10^{18}$ elektronen per seconde.

Figuur 248 – Definities van de begrippen debiet, stroomsnelheid en stroomsterkte.

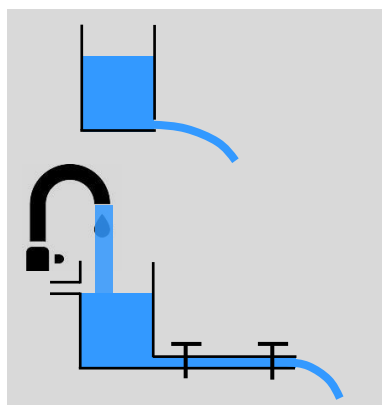
Spanning en stroom

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 249 (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 249 (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 slang met de slangklem-



Figuur 249 – Analogie voor het begrip spanning.

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

Figuur 250 – Het verband tussen waterdruk, weerstand en stroomsterkte.

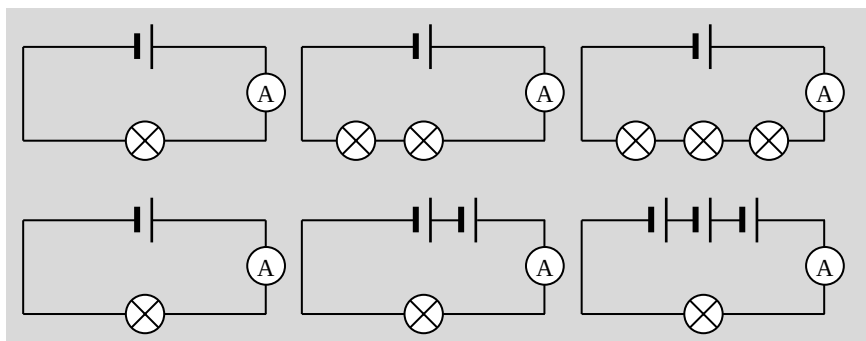
batterijen spanning	lampjes weerstand	felheid stroomsterkte
groter	gelijk	groter
gelijk	groter	kleiner
groter	groter	?

Figuur 252 – Het verband tussen spanning, weerstand en stroomsterkte.

men gedeeltelijk dichtklemmen. Kennelijk werken de slang en de slangklemmen de stroom tegen. Deze tegenwerking noemt je *weerstand*.

Tussen waterdruk, weerstand en stroomsterkte bestaat het in de tabel van figuur 250 weergegeven verband. Waterdruk voor water in leidingen kan daarvoor als analogie dienen voor spanning in een elektrische schakeling. Bekijk de elektrische schakelingen van figuur 251.

- 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 251 – Schakelingen voor het demonstreren van het verband tussen spanning, weerstand en stroomsterkte.

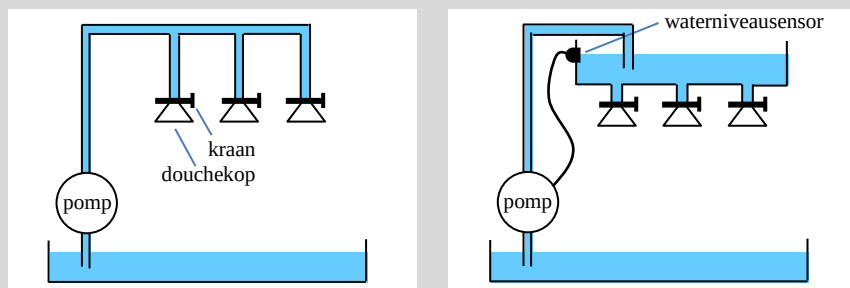
Er geldt: de spanning van de batterij stuwt de stroom voort, en de stroom wordt tegengewerkt door de weerstand van de lampjes, zoals weergegeven in de met figuur 250 vergelijkbare tabel van figuur 252.

De in figuur 253 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 de figuur hieronder 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.



Een kampdouche in twee varianten: zonder (links) en met (rechts) voorraadvat.

In de figuur hierboven rechts is een voorraadvat toegevoegd aan de kampdouche. 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.

Figuur 253 – Analogie voor het maken van een onderscheid tussen een spanningsbron en een stroombron.

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.

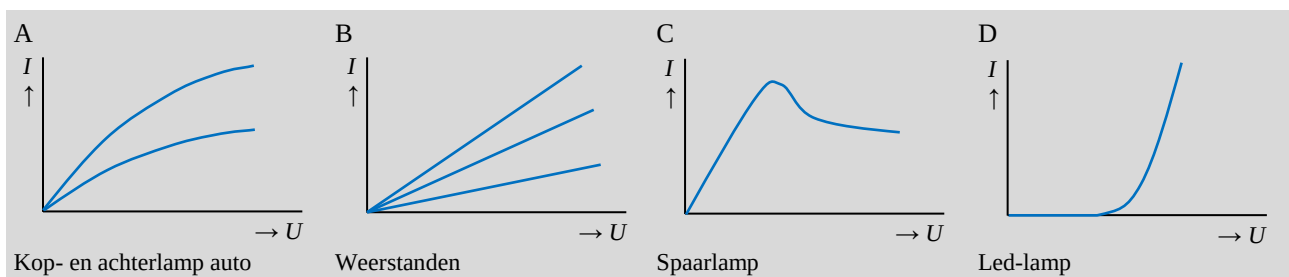
Water in leidingen	Elektrische schakeling
Waterpomp zonder voorraadvat (of watertoren)	Stroombron
Waterpomp met voorraadvat (of watertoren)	Spanningsbron
Leidingen of slangen	Bedrading
Douchekop	Weerstand
Kraan	Schakelaar
Water stroomt	Elektronen stromen
Watermeter	Stroommeter
Debiet (liter/s)	Stroomsterkte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

Figuur 254 – Overeenkomsten tussen de analogie van water in leidingen en de elektrische schakeling.

Weerstandsregel

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 252.

In het derde leerjaar kan de onderlinge afhankelijkheid van spanning, stroomsterkte en weerstand worden weergegeven door de volgende formule die weerstand definieert: $R = U/I$.



Figuur 255 – Het I,U -diagram van verschillende soorten weerstanden.

Dat voorwerpen verschillende weerstand hebben, is te zien in de I,U -diagrammen van figuur 255: 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 de weerstand van een led-lamp af.

De weerstandsregel luidt $U = I \cdot R$, met U de spanning van de bron (in volt: V), I de stroomsterkte in de stroomkring (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 samen-

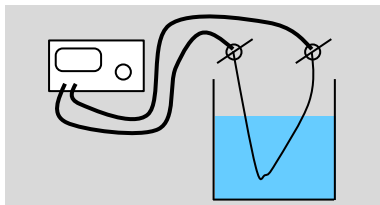
Leerlingdenkbeelden

Bij het denken over (veranderingen in) elektrische schakelingen kunnen leerlingen *lokaal* en/of *sequentieel* redeneren.

Lokaal redeneren – Ieder punt in een schakeling wordt apart bekeken, onafhankelijk van wat er zich voor of achter dat punt bevindt. Bij een splitsing in een parallelschakeling betekent dat bijvoorbeeld dat de stroom zich gelijk verdeelt over de verschillende parallelle takken, onafhankelijk van de weerstanden in deze takken.

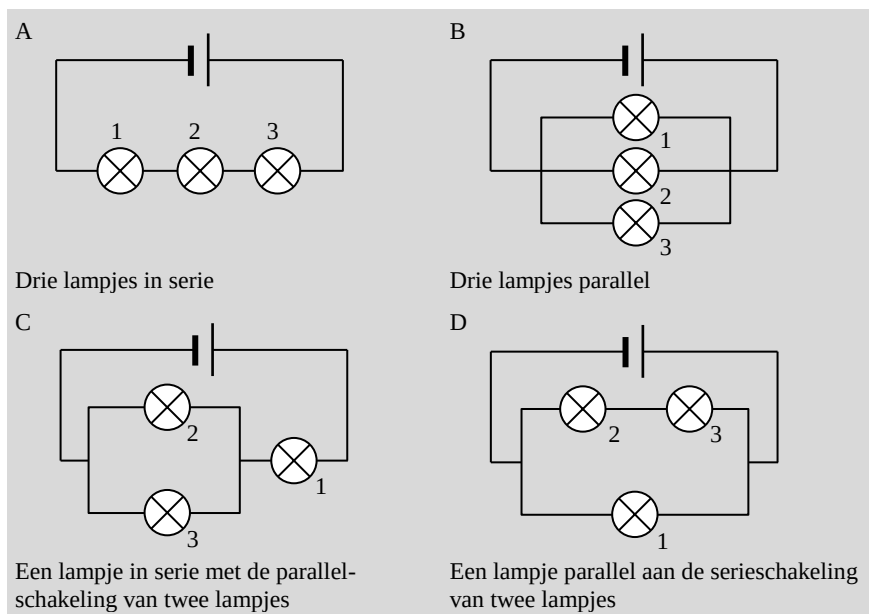
Sequentieel redeneren – Een verandering in een schakeling heeft alleen invloed op dat deel van de schakeling ‘achter’ het punt waar iets is veranderd, ofwel ‘stroomafwaarts’. In het deel van de schakeling vóór de verandering is niets veranderd. In leerlingentaal: “De stroom weet daar nog niet dat er verderop iets is veranderd.”

Figuur 257 – Mogelijke redeneerwijzen van leerlingen over elektrische schakelingen.



Figuur 258 – De opstelling bij het instapprobleem voor de energieregel.

gestelde schakelingen. Om de denkbeelden van leerlingen daarover te inventariseren, kun je gebruik maken van opstellingen met de schakelschema's van figuur 256. De richtvragen daarbij zijn: “In welke schakeling kunnen alle lampjes tegelijk normaal branden?” en “Wat gebeurt er met de andere lampjes als je één lampje losdraait?”



Figuur 256 – Schakelingen voor het inventariseren van leerlingdenkbeelden over spanning en stroomsterkte in samengestelde schakelingen.

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 *weerstandregel* 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.

Energieregel

De proef met de gloeiende draad die je onderdompelt in water (zie figuur 258) 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 het 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.

Lespraktijk

Leerlingen kregen als probleem voorgelegd 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.

Figuur 259 – Leerlingdenkbeeld over de weerstand van een opgerold snoer.

Taalgebruik

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 opwelkend 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.

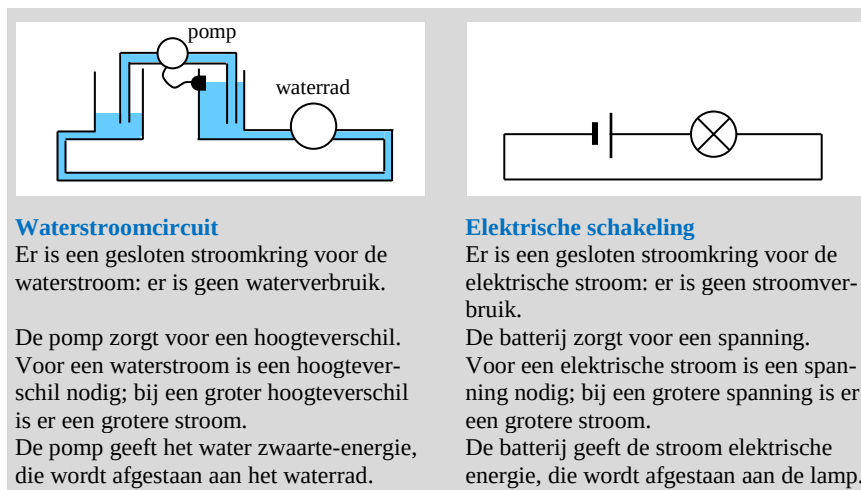
Figuur 261 – De betekenis van de woorden spanningsbron, stroombron, bron, stroom en spanning volgens Van Dale – Groot woordenboek der Nederlandse taal.

Een 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 figuur 259.

Spanning: veroorzaker van stroom of leverancier van energie

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

- 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 260 – In de waterstroomanalogie zijn beide manieren waarop je naar spanning kunt kijken zichtbaar.

Aandachtspunten – 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 figuur 261 de betekenis van de woorden spanningsbron, stroombron, bron, stroom en spanning.

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.

Ook het gebruik van analogieën vereist extra aandacht. 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 Hagstein 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 figuur 262 zijn voor een aantal analogieën de overeenkomsten met de elektrische stroomkring op een rij gezet, evenals hun beperkingen (waar dus geen overeenkomst meer is).

Analogie	Overeenkomsten	Beperkingen
Verkeersstromen	Wegennet ↔ bedrading Autostraat ↔ elektronenstroom Wegversmalling ↔ dunnere bedrading Ophaalbrug ↔ schakelaar Splitsing ↔ splitsing (stroomregel)	Geen bron
Tuinsproei-installatie	Water in een slang ↔ elektronen in leidingen Waterdruk / hoogte sproeier ↔ spanning Versmalling ↔ dunnere 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 Radiators ↔ lampje cq apparaat	Geen spanningsbron
Bloedsomloop	Hart ↔ spanning- en stroombron Bloeddruk ↔ elektronenspanning Bloedstroom ↔ elektronenstroom Stroomregel ↔ stroomregel Drukregel ↔ spanningsregel	Geen energietransport (wel stoffentransport)

Figuur 262 – Overeenkomsten en beperkingen van verschillende analogieën voor de elektrische stroomkring.

Een derde aandachtspunt is de *voorkennis* van de leerlingen. 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 v : snelheid van stromende deeltjes (m/s).

Het debiet D wordt dan gegeven door D (in m^3/s) = $A \cdot v$ of door D (in kg/s) = $\rho \cdot A \cdot v$.

Taalgebruik

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.

Figuur 263 – De betekenis van de woorden analogie, model en theorie volgens Van Dale – Groot woordenboek der Nederlandse taal.

Een laatste aandachtspunt heeft weer betrekking op het *taalgebruik*, nu van de woorden analogie, model en theorie. Meestal wordt in leerboeken gekozen voor het woord model in plaats van het woord analogie. We hebben een voorkeur voor het woord analogie – met de in figuur 263 gegeven omschrijving – 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.

Het bovenstaande leidt tot de volgende aanbevelingen voor het vormgeven van onderwijs over elektrische schakelingen:

- 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 constante stroom levert (dynamo, waterpomp) en een bron met een constante spanning en 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).

6.5 Arbeid, warmte en energie

Arbeid, warmte en energie zijn begrippen die zowel in het dagelijkse taalgebruik als in de vaktaal een belangrijke rol spelen. Van belang is aan te sluiten op de denkbeelden van de leerlingen vanuit hun dagelijkse ervaring en die uit te bouwen tot wetenschappelijke denkbeelden. Daarbij helpt een overzicht over de opbouw van het begrip energie in de opeenvolgende leerjaren.

De leerstofschemata's in deze paragraaf bevatten een aantal kernbegrippen en een aantal relaties tussen die begrippen. De kernbegrippen zijn geplaatst in een ovaal, de lijnen geven aan dat begrippen bij elkaar horen. Leesvolgordes worden aangegeven met een pijl. Objecten (systemen) zijn getekend als een rechthoek.

Leerlingdenkbeelden

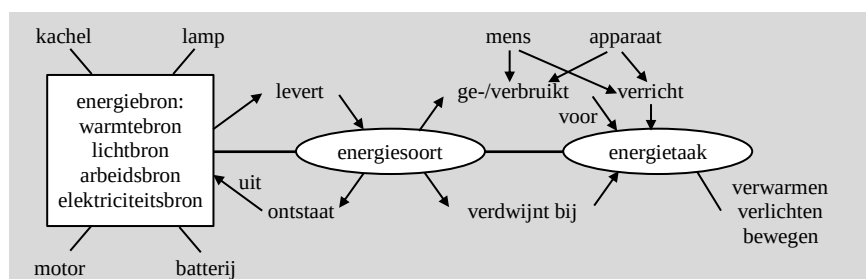
- Energie is alleen gekoppeld aan levende wezens, als iets dat nodig is om te leven en actief te kunnen zijn.
- Energie is iets dat opgeslagen ligt in bepaalde voorwerpen, en dat veranderingen kan veroorzaken.
- Energie is gekoppeld aan kracht en beweging (geen beweging betekent geen energie), kracht en energie (en ook arbeid en vermogen) zijn synoniemen.
- Energie wordt gezien als brandstof: 'brandstof is energie' in plaats van 'bevat energie' of 'is een energiebron'.
- Energie wordt opgevat als een soort 'vloeistof': het 'vloeit' vanuit het ene voorwerp naar het andere.
- Het idee van energiebehoud wordt niet als noodzakelijk gezien: in plaats van energiebehoud is sprake van 'energieverlies' of 'opraken van energie'.

Figuur 264 – Mogelijke leerlingdenkbeelden over energie, energieomzettingen en energiebehoud.

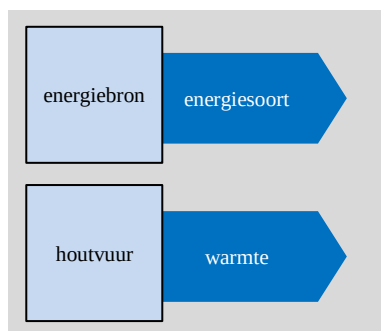
Energiebron, energietaak en energiesoort

In de natuurkunde is energie een buitengewoon abstracte en complexe grootheid. In het tweede leerjaar kan een belangrijk aspect van energie worden begrepen door aan te sluiten bij het taakbegrip uit het dagelijks leven. Daarbij gaat het om het neerzetten van het volgende beeld: een *energiebron* kan een *energietaak* uitvoeren door het leveren van een *energiesoort* (zie figuur 265). Voorbeelden van energietaken zijn iets verwarmen, verlichten, in beweging zetten en bestralen. Voorbeelden van energiebronnen zijn warmtebronnen (zoals een kachel), licht-

bronnen (zoals een lamp of een kaars), arbeidsbronnen (zoals een motor of een trekdier) en elektriciteitsbronnen (zoals een batterij of accu, met daaraan gekoppeld een elektrische kachel, motor of lamp). De energiebron levert een energiesoort die verbruikt wordt voor de energietaak.



Figuur 265 – Leerstofschemarond energiebronnen, energiesoorten en energietaken.



Figuur 266 – Eenvoudig leerstofschemavoor een energiebron en voor een warmtebron.

In leerboeken wordt een energiebron met een energiesoort vaak weergegeven met een vereenvoudigd leerstofschem, zoals in figuur 266. In het leerstofschem van een warmtebron zet je in het vierkant de warmtebron en in de pijl de warmte.

Voor het benoemen van energiesoorten zijn drie verschillende mogelijkheden. Je kunt energiesoorten benoemen naar:

- de energiebron, zoals fossiele brandstof, windenergie, waterkrachtenergie, zonne-energie, getijde-energie en biomassa;
- de energiesoort die in de bron aanwezig is, zoals veerenergie, gravitatie-energie, magnetische energie, elektrische energie, bewegingsenergie, inwendige energie en kernenergie;
- de energiesoort die de bron levert, zoals straling, arbeid, warmte en elektrische energie.

Een consequente naamgeving zoals in figuur 267, kan het begrip bij leerlingen bevorderen.

Bron die energie levert	Naam volgens de bron	Naam volgens de energiesoort die in de bron aanwezig is	Naam volgens de energiesoort die de bron levert
zon	zonne-energie	kernenergie	stralingsenergie
windmolen	windenergie	bewegingsenergie	elektrische energie
steenkool	brandstof	chemische energie	warmte
kerncentrale	kernenergie	kernenergie	elektrische energie
stuwmeer	waterkracht	zwaarte-energie	elektrische energie
biomassa	biomassa	chemische energie	warmte

Figuur 267 – Mogelijkheden voor de naamgeving van energiesoorten.

Aandachtspunten – Een probleem doet zich voor bij het gebruik van het woord *energiebron*. In het algemeen is een energiebron alles wat energie levert. Bij het woord energiebron ligt het accent op het beschikbaar komen van een *energiehoeveelheid*. Hier maken we onderscheid in soorten energiebronnen zoals warmtebron, lichtbron, arbeidsbron of elektriciteitsbron. Hierbij ligt het accent op het beschikbaar komen van de *energiesoort*.

Verder is het lastig dat bij het benoemen van energiesoorten al onderscheid gemaakt moet worden tussen energie die in de bron aanwezig is, de energiebron zelf en energie die de bron levert. Als voorbeeld daarvan nemen we hieronder drie verschillende warmtebronnen, die verschillende soorten energie verbruiken.

- In brandstoffen zit chemische energie. Een houtkachel, een gasfornuis en een bunsenbrander verbruiken chemische energie en leveren warmte.
- Een stopcontact levert elektrische energie. Een verwarmingsapparaat zoals een strijkijzer of een waterkoker verbruikt elektrische energie en levert warmte.

- De zon levert zonne-energie. In de zon vinden kernreacties plaats. De zon verbruikt kernenergie en levert stralingsenergie. Deze stralingsenergie kan voorwerpen verwarmen. Zo word je warm als je in de zon zit.

Energieoverdracht

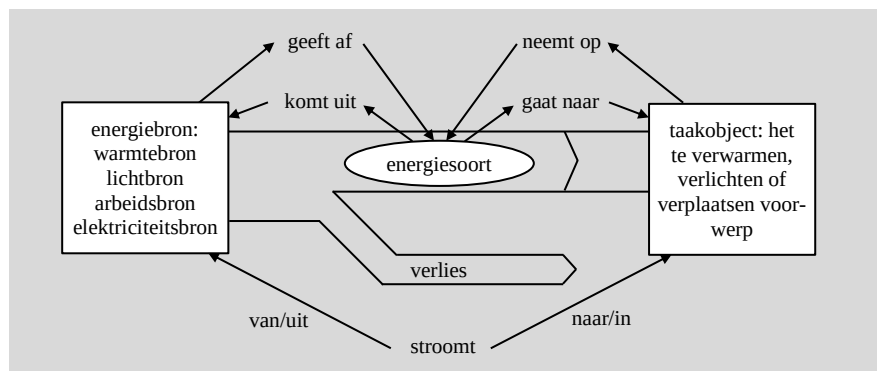
In het derde leerjaar wordt aan het begrip energie het beeld toegevoegd dat energie stroomt. Vanuit de energiebron gaat een (quasi-materiële) *energiestroom* naar het taakobject. Stromingsenergiesoorten zijn warmte, elektrische energie, stralingsenergie en arbeid. In figuur 268 is een energiestroomschema weergegeven. De hoeveelheid energie wordt gemeten in joule (J). De breedte van de pijlen staat voor de *energiehoeveelheid*.

Bij energieoverdracht geldt voor de energiestroom *energiebehoud*. De energie die bij de bron ontstaat, stroomt in zijn totaliteit ergens naar toe. De energiestroom bestaat uit een bruikbaar deel dat naar het taakobject stroomt, en een verliesdeel dat naar elders (bijvoorbeeld de omgeving) stroomt en daar verloren gaat voor gebruik. Dit heet *overdrachtsverlies*. De efficiëntie van de overdracht wordt aangegeven met het rendement.

Voor energieoverdracht wordt het omzettingsrendement in formulevorm gedefinieerd als:

$$\eta = \frac{E_{\text{bruikbaar}}}{E_{\text{totaal}}}$$

In deze formule is $E_{\text{bruikbaar}}$ de energie die benut wordt voor de taak en E_{totaal} de energie die de energiebron levert.



Figuur 268 – Leerstofschema rond energieoverdracht en stroming van energie.

Aandachtspunten – Er is discussie mogelijk over het gebruik van de woorden *energieverbruik* en *energiegebruik*. Beide woorden zijn bruikbaar. Bij energiegebruik ligt de nadruk op de taak die de energie zal uitvoeren: de energie wordt ergens voor gebruikt. Bij energieverbruik ligt de nadruk op het verbruik van energiesoorten waarvoor betaald moet worden.

Het gebruik van de woorden *energiebehoud* en *energieverlies* lijkt tegenstrijdig. Energiebehoud betekent dat de totale hoeveelheid energie behouden blijft. Een deel van de energie gaat echter verloren als warmte die wordt afgegeven aan de omgeving, en niet meer nuttig te gebruiken is.

Energieomzetting

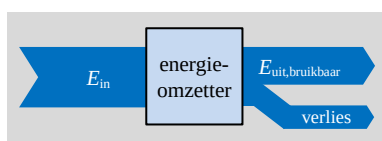
Als de voor het verrichten van een taak benodigde stromingsenergiesoort niet (direct) beschikbaar is, dan kan gebruik gemaakt worden van een omzetter om de ene energiesoort om te zetten in de andere. Voorbeelden zijn een warmtemotor, elektromotor, dynamo, pompelaar en lamp. Bij energie-omzetting is sprake van het verdwijnen van de ene energiesoort en het gelijktijdig ontstaan van andere energiesoorten (zie figuur 269). De omzetter wordt geplaatst tussen de energiebron en het taakobject.

Voor een energieomzetting geldt dat de hoeveelheid energie behouden is. De energie-uitstroom bestaat echter uit een bruikbaar deel en een verliesdeel. Een deel van de energie gaat verloren als warmte afgegeven aan de omgeving, en is

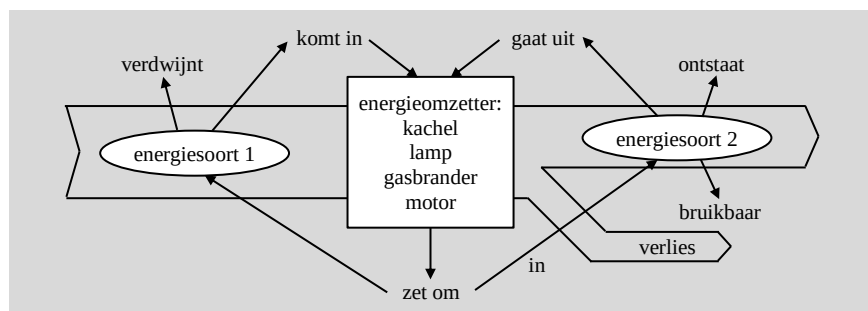
niet meer nuttig. De efficiëntie van de omzetting wordt aangegeven met het rendement van de energieomzetter:

$$\eta = \frac{E_{\text{uit,buikbaar}}}{E_{\text{in}}}$$

Sommige energiebronnen zoals de elektrische lamp (lichtbron) of elektromotor (arbeidsbron) kunnen ook als omzetter van stromingsenergiesoorten beschreven worden.



Figuur 270 – Eenvoudig leerstofsche-
ma voor een energieomzetter.



Figuur 269 – Leerstofsche-
ma rond energieomzetting en stroming van energie.

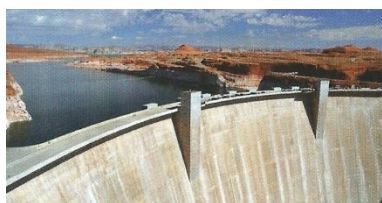
In leerboeken wordt gebruik gemaakt van een vereenvoudigd leerstofsche-
ma, zoals in figuur 270.

Aandachtspunten – Evenals bij energioverdracht is er bij energieomzettingen
discussie mogelijk over het gebruik van de woorden *energieverbruik* en *energie-
gebruik*. Ook hier zijn beide woorden in dezelfde betekenis bruikbaar.

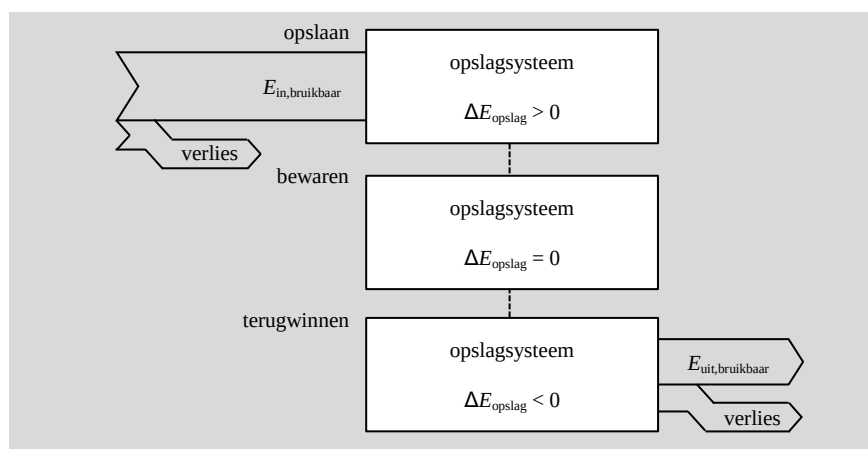
Het gebruik van de woorden *energiebehoud* en *energieverlies* is ook hier
verwarrend. Bij energiebehoud ligt het accent op het feit dat de hoeveelheid
energie behouden blijft. De energiesoorten blijven zeker niet behouden: bij een
omzetting verdwijnt de ene energiesoort en ontstaan andere energiesoorten. Bij
energieverlies ligt het accent op de warmte die bij iedere omzetting verloren gaat
in de omgeving.

Energieopslag

In het derde of vierde leerjaar wordt het energiebegrip weer verder uitgebreid:
naast het taak-, stroom- en omzettingsaspect heeft energie ook een opslagaspect.
In fossiele brandstoffen is energie aanwezig, maar ook in stuwmeren of in bewe-
gende lucht. Energie wordt bruikbaar als je het een tijd kunt opslaan en op
een geschikt moment weer kunt gebruiken.



Figuur 272 – Energieopslag in een
stuwmeer.



Figuur 271 – Leerstofsche-
ma rond energieopslag.

Een opslagsysteem kan een energiestroom opnemen en een tijd later deze weer
in (bijna) even grote hoeveelheden afgeven (zie figuur 271). Kennelijk is de
energie een tijdje omgezet in een opslag-energiesoort. Voorbeelden van opslag-

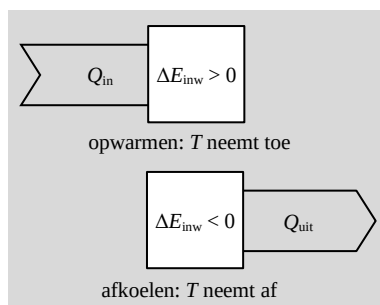
systemen zijn een waterspaarbekken, vliegwiel en accu. Voorbeelden van opslag-energiesoorten met de bijbehorende energiestroom zijn warmte en inwendige energie bij opwarmen, arbeid en zwaarte-energie bij een hijskraan, arbeid en bewegingsenergie bij een vliegwiel, arbeid en inwendige energie bij een fietspomp, en elektrische energie en elektrochemische energie bij een accu.

In natuurlijke energiebronnen zoals brandstoffen, zon en wind, is de energie van nature aanwezig. In kunstmatige bronnen zoals een accu of waterspaarbekken wordt eerst energie opgeslagen die later wordt teruggewonnen.

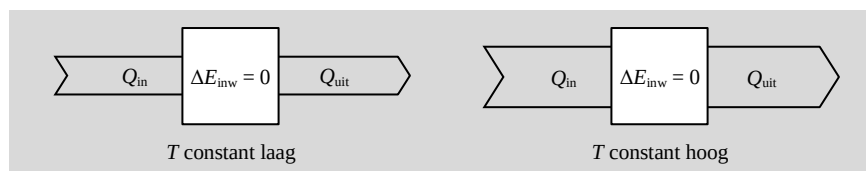
Warmte, temperatuur en inwendige energie

Energieopslag speelt een rol bij het opwarmen, afkoelen en op temperatuur houden van ruimten (zie figuur 273). Bij het opwarmen van een voorwerp wordt warmte aan het voorwerp toegevoerd. De temperatuur van het voorwerp en de inwendige energie die opgeslagen wordt in het voorwerp nemen toe. Bij het afkoelen van een voorwerp geeft het voorwerp warmte af. De temperatuur van het voorwerp en de inwendige energie die opgeslagen is in het voorwerp nemen af.

Als een voorwerp een constante temperatuur heeft, dan is de inkomende warmte even groot als de uitgaande warmte. Voor een hogere constante temperatuur is een grotere instroom en uitstroom van warmte nodig (zie figuur 274).

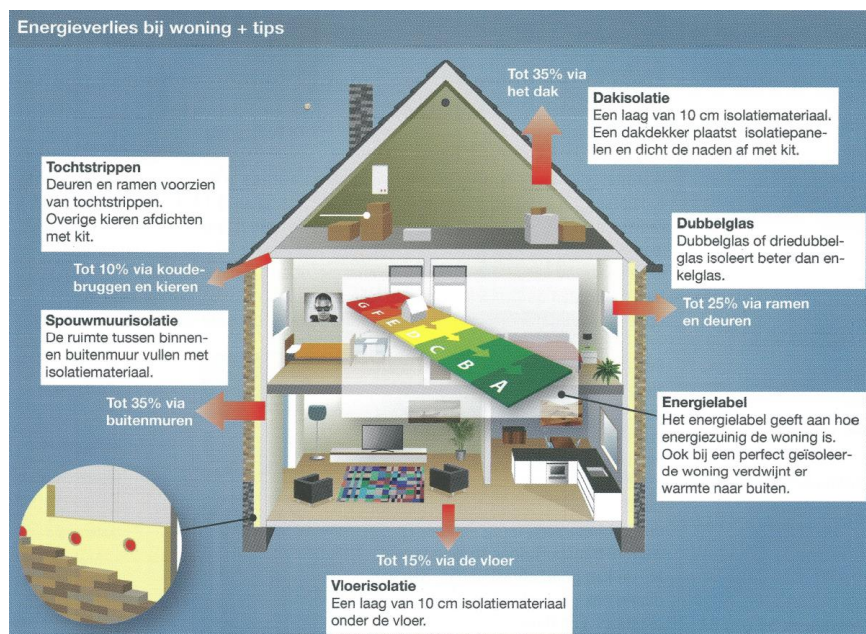


Figuur 273 – Leerstofschemata voor het opwarmen en afkoelen van een voorwerp.



Figuur 274 – Leerstofschemata voor het op temperatuur houden van een voorwerp.

Een interessant praktijkvoorbeeld is het isoleren van een woning om energie te besparen (zie figuur 275). Door de uitstroom van energie te beperken, wordt het energieverbruik lager. Vanzelfsprekend draagt het lager zetten van de thermostaat ook bij aan energiebesparing.



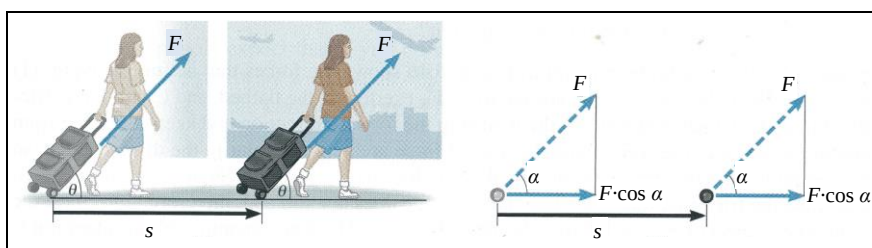
Figuur 275 – De uitstroom van warmte beperken door isolatie. Bron: *Overal NaSk 3 vmbo-kgt* (5^e editie, pg. 59).

Arbeid

In leerboeken wordt arbeid vaak ingevoerd door te kijken naar het voorbeeld waarin iemand met een touw een kar een eind voorttrekt over een horizontale weg. Arbeid wordt dan gedefinieerd met de arbeidsregel:

$$W = (F \cdot \cos \alpha) \cdot s$$

In deze formule is W de door de kracht verrichte arbeid, F de op het voorwerp uitgeoefende kracht, $F \cdot \cos \alpha$ de component van de kracht in de richting van de verplaatsing, en s de verplaatsing van het voorwerp (of preciezer: de verplaatsing van het aangrijpingspunt van de kracht) zoals weergegeven in figuur 276.



Figuur 276 – Arbeid verricht door een kracht bij verplaatsing van een voorwerp.

Aandachtspunten – Het is goed om je te realiseren dat bij het begrip *arbeid* in het kader van energiebronnen, energiestromen en energieomzettingen een andere voorstelling hoort dan bij de arbeid uit de arbeidsregel. In energietermen staat arbeid voor de overdracht van energie door krachtwerking van de omgeving (degene die de kar trekt) naar het gekozen systeem (de gesleepte kar) over de systeemgrenzen heen. Daarbij mag je arbeid voorstellen als een energiestroom, net zoals je warmte mag voorstellen als een energiestroom. Degene die de kar trekt levert via arbeid energie aan de kar. Dit zie je terug in het taalgebruik: een kracht *verricht* arbeid, een arbeidsbron zoals de mens of een motor *levert* arbeid.

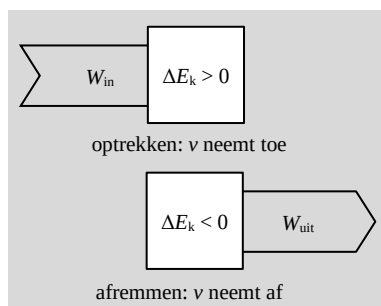
Arbeid, snelheid en bewegingsenergie

Om een voorwerp in beweging te krijgen, moet iets of iemand een kracht uitoefenen. Het voorwerp krijgt dan snelheid, en dus bewegingsenergie. De bewegingsenergie (of kinetische energie) hangt af van de massa en de snelheid van het voorwerp:

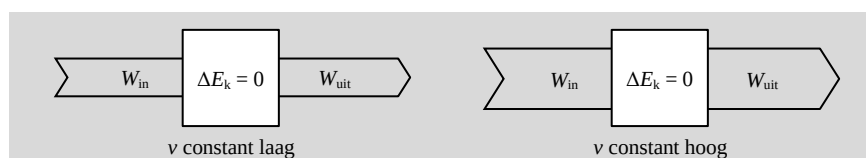
$$E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

Bij het optrekken van een voertuig zoals een auto levert de motor inkomende arbeid, en de bewegingsenergie van de auto neemt toe (zie figuur 277). Als een voertuig remt, dan neemt de snelheid en dus de bewegingsenergie af. De remkracht verricht uitgaande arbeid tijdens het remmen. De uitgaande arbeid die de remkracht verricht, is even groot als de afname van de bewegingsenergie.

Bij een evenwichtssituatie met een constante snelheid is de ingaande arbeid even groot als de uitgaande arbeid. Voor een grotere constante snelheid is een grotere in- en uitstroom van arbeid nodig (zie figuur 278).



Figuur 277 – Leerstofschemadiagram voor het optrekken en afremmen van een voertuig



Figuur 278 – Leerstofschemadiagram voor het met constante snelheid rijden van een voertuig.

Aandachtspunten – Het is voor het begrijpen van evenwichtssituaties van belang om in de uitleg niet alleen in te gaan op de evenwichtssituatie, maar eerst de niet-evenwichtssituaties van optrekken en afremmen te bespreken. De verandering van de bewegingsenergie bij optrekken en afremmen is gemakkelijker te begrijpen dan het constant zijn van de bewegingsenergie bij constante snelheid. Ook is het nodig om te beschrijven hoe je van de ene evenwichtssituatie met een bepaalde snelheid komt in een andere evenwichtssituatie met een hogere of lagere snelheid.

In de formule voor de bewegingsenergie staat de snelheid in het kwadraat. Dit betekent dat snelheidsverandering een veel grote invloed heeft op de bewegingsenergie dan een verandering van de massa.

Arbeid, hoogte en zwaarte-energie

Als water uit een stuwmeer naar beneden stroomt, verdwijnt zwaarte-energie en

ontstaat elektrische energie. Bij het omhoog pompen van water verdwijnt elektrische energie en ontstaat zwaarte-energie.

Zwaarte-energie is de energie die een voorwerp heeft als het hoogte heeft boven het aardoppervlak:

$$E_z = m \cdot g \cdot h$$

Door een voorwerp op te tillen, vergroot je de zwaarte-energie door arbeid te leveren. Als een voorwerp valt, neemt de zwaarte-energie af.

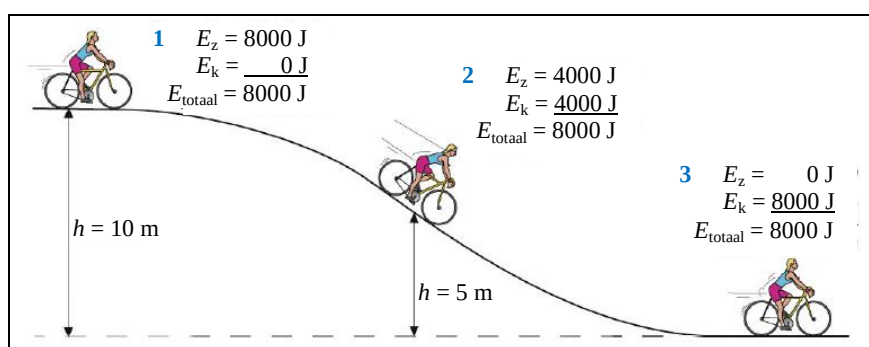
Aandachtspunten – Energieoverdracht bij zwaarte-energie is gemakkelijk in te zien bij het optillen van een voorwerp. Degene die tilt levert arbeid die omgezet wordt in zwaarte-energie. Het is lastiger om te zien wat er gebeurt bij afname van de zwaarte-energie. Bij een valbeweging is er namelijk geen sprake van energieoverdracht van het vallende voorwerp naar een ander systeem, maar van een energieomzetting van zwaarte-energie in bewegingsenergie – zoals hieronder bij ‘Behoud van mechanische energie’ wordt besproken.

Dezelfde situatie doet zich voor bij traplopen. Het is gemakkelijk in te zien dat degene die de trap oploopt arbeid levert die wordt omgezet in zwaarte-energie. Lastiger is te begrijpen wat er gebeurt bij het naar beneden lopen. Daar wordt zwaarte-energie omgezet in bewegingsenergie, maar bij iedere stap remt degene die de trap afloopt af en wordt bewegingsenergie omgezet in warmte.

Behoud van mechanische energie

Je staat met je fiets bovenaan een helling. Je hebt daar zwaarte-energie. Om de helling af te dalen hoef je geen moeite te doen. Terwijl je de helling afdaalt wordt de zwaarte-energie steeds kleiner, maar de bewegingsenergie wordt onder-tussen steeds groter. In dit voorbeeld wordt de zwaarte-energie omgezet in bewegingsenergie. Dit is de *wet van behoud van mechanische energie*. Deze wet geeft aan dat de totale hoeveelheid mechanische energie niet verandert als er geen uitwendige krachten werken, dus dat dan zwaarte-energie en bewegings-energie in elkaar worden omgezet.

In figuur 279 zie je dat de bewegingsenergie onderaan de helling gelijk is aan de zwaarte-energie bovenaan de helling: $E_z = E_k$. Dit geldt echter alleen als de wrijving niet wordt meegerekend. Dat is in de werkelijkheid niet het geval. Bij elke beweging komt ook altijd warmte vrij, en neemt de totale hoeveelheid mechanische energie af.



Figuur 279 – De wet van behoud van mechanische energie in het theoretische geval van afwezigheid van warmteontwikkeling door wrijving.

Aandachtspunten – De arbeid van de zwaartekracht is een interne kracht die de omzetting van zwaarte-energie in bewegingsenergie beschrijft. In dit geval geldt: $W_z = -\Delta E_z = +\Delta E_k$. Van belang is om in te zien dat hier geen sprake is van energieoverdracht van een arbeidsbron naar een voorwerp. De arbeid van de zwaartekracht kun je dus niet beschrijven als een energiestroom. Op het moment dat je een voorwerp optilt in het zwaartekrachtsveld is er wél sprake van energieoverdracht, namelijk van degene die tilt naar het getilde voorwerp. Dan mag je de arbeid van de spierkracht wel beschrijven als een energiestroom.

Praktijkvoorbeelden

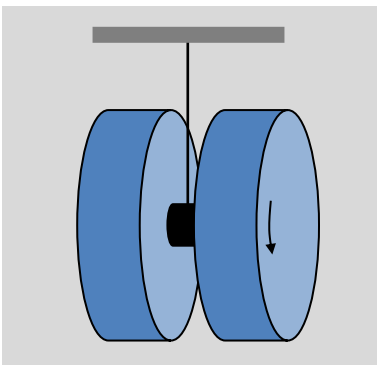
Praktijkvoorbeelden laten zich soms gemakkelijker begrijpen met behulp van



Figuur 280 – Gewichtheffen.



Figuur 281 – Polsstokhoogspringen.



Figuur 282 – Jojo.

warmte, arbeid en energie dan met behulp van kracht, snelheid en versnelling. Hieronder bespreken we een aantal voorbeelden uit sport en verkeer.

Gewichtheffen – Een gewichtheffer verbruikt chemische energie die was opgeslagen in de koolhydraten in de spieren. De koolhydraten worden verbrand en omgezet in warmte (als de lichaamstemperatuur tenminste niet is veranderd) en in zwaarte-energie. Tijdens het optillen van het gewicht levert het lichaam arbeid. Maar daarna, bij het hooghouden van het gewicht, niet meer – ondanks alle inspanning die de gewichtheffer daarvoor moet doen. De tilkracht zorgt dan niet meer voor energieoverdracht naar een de halter. Er is namelijk geen sprake meer van een verplaatsing in de richting van de tilkracht, ook niet als de gewichtheffer zich voor- of achteruit zou gaan bewegen.

Hoogspringen – Ondanks de ingewikkelde beweging van een hoogspringer is de beweging van het zwaartepunt van een hoogspringer betrekkelijk eenvoudig. Het zwaartepunt volgt een kogelbaan waarbij bewegingsenergie en zwaarte-energie in elkaar worden omgezet. Realiseer je dat het zwaartepunt van de springer onder de lat door beweegt.

Polsstokhoogspringen – Bij het polsstokhoogspringen zorgt de polsstok ervoor dat een groot deel van de bewegingsenergie van de springer via veerenergie wordt omgezet in zwaarte-energie. Bij de aanloop wordt de bewegingsenergie omgezet in veerenergie van de polsstok. Daarbij levert de springer arbeid aan de polsstok. Bij het uitveren van de polsstok levert de stok arbeid aan de springer en wordt veerenergie omgezet in bewegingsenergie en zwaarte-energie.

Fietsen met constante snelheid – Een fietser fietst met een snelheid van 20 km/h. Door op een gegeven moment uit alle macht te trappen neemt de snelheid van de fietser toe tot een topsnelheid van bijvoorbeeld 30 km/h wordt bereikt. De vraag is dan: “Waarom is er sprake van een maximale snelheid en neemt de snelheid niet onbeperkt toe, ook al blijf je uit alle macht trappen?” En deze vraag geldt niet alleen voor fietsen, maar ook voor andere voertuigen zoals scooters en auto's.

Om dit te begrijpen is het nodig om in te zien dat er een tegenwerkende kracht is, waardoor energie in de vorm van warmte wordt afgevoerd naar de omgeving. De tegenwerkende kracht wordt veroorzaakt door weerstand van de lucht, maar ook door de weerstand van de band op het wegdek. De luchtweerstand neemt toe met de snelheid.

Trap je niet, dan neemt de snelheid van de fiets af tot stilstand. Als je remt sta je nog veel eerder stil. Trap je wel, dan neemt de snelheid van de fiets toe tot het moment dat je met de trapkracht evenveel energie toevoert aan de fiets als er door de weerstand wordt afgevoerd. Dan is de bewegingsenergie van de fiets constant. Ga je harder trappen, dan neemt de toevoer van energie en daarmee de bewegingsenergie van de fiets toe. Bij een toename van de snelheid wordt de luchtweerstand echter groter, en dus ook de afvoer van energie. De snelheid van de fiets wordt weer constant als aanvoer en afvoer van energie even groot zijn.

Vanuit een krachtenbeschouwing is het moeilijk voor te stellen hoe een in- en uitdeukende band kan zorgen voor een tegenwerkende kracht. Vanuit een energiebeschouwing is het gemakkelijker in te zien. Door het in- en uitdeuken van de band wordt warmte ontwikkeld in de band en wordt energie afgevoerd. Dit correspondeert met een tegenwerkende kracht.

De fiets met fietser is een van de efficiëntste energieomzetters. Een fietser heeft een rendement van zo'n 20%. Dat wil zeggen dat 20% van de omgezette chemische energie omgezet wordt in arbeid en daarmee in mechanische energie van de fiets met fietser.

Vliegwielbus – Bij afremmen wordt de bewegingsenergie van een voertuig omgezet in warmte die wordt afgevoerd naar de omgeving. Bij een stadsbus die regelmatig optrekt en afremt, loont het de moeite om de bewegingsenergie op te slaan in een vliegwiel, en deze opgeslagen energie bij het optrekken weer te benutten. Er blijft natuurlijk energieverlies optreden bij het aan- en afkoppelen van het vliegwiel. De opslag van energie in een vliegwiel is te vergelijken met wat er gebeurt bij een jojo. Zonder wrijvingskracht is er bij het dalen sprake van een omzetting van zwaarte-energie naar bewegingsenergie (ook in de vorm van



Figuur 283 – Crashtest.

rotatie-energie) en bij het stijgen een omzetting van bewegingsenergie naar zwaarte-energie.

Botsen en kreukelzone – Als een auto bij een crashtest tegen een botsblok botst, vervormt de kreukelzone van de auto en komt de auto tot stilstand. De auto heeft dan geen bewegingsenergie meer. Tijdens de botsing werkt er een grote kracht op de auto. Deze kracht verricht arbeid over de afstand die de auto in-deukt. Daardoor neemt de bewegingsenergie af en wordt nul zodra de auto stilstaat. Als de kracht over een grotere afstand werkt, dan is de kracht kleiner en is er minder schade. De kreukelzone mag niet te slap zijn, maar ook niet te stug.

Aandachtspunten – In de in deze paragraaf geschetste leerstofopbouw is de begripsvorming in eerste instantie gericht op verheldering van de praktijk nabije situaties, uitgaande van de omgangstaal. Later wordt de begripsvorming steeds meer gericht op een opbouw van de vaktheorie met een veel preciezere vaktaal. Vaktheorie en praktijktoepassingen komen na verloop van tijd verder uit elkaar te liggen. De begrippen ontwikkelen zich van concreet en contextspecifiek naar abstract en voor meer contexten geldend (bijvoorbeeld: apparaat, omzetter, systeem).

Aan het begrip *energie* worden geleidelijk steeds meer kenmerken onderkend. Het begrip wordt daardoor steeds complexer. Voor de leerstofschemata's betekent dit dat begrippen door steeds meeromvattende relaties met elkaar in verband worden gebracht.

6.6 Deeltjesmodel en molecuultheorie

In de natuurkundelessen wordt in het tweede leerjaar bij het onderwerp faseovergangen meestal het deeltjesmodel voor stoffen geïntroduceerd. Het dient dan tevens als een voorbeeld voor het werken met modellen in de natuurkunde. Met behulp van eenvoudige proefjes worden eigenschappen van de stoffen verkend (gassen, vloeistoffen of vaste stoffen). Deze eigenschappen van stoffen worden omgezet in eigenschappen van de deeltjes uit het deeltjesmodel. Een proefje als het even opendraaien van de gaskraan leidt tot de constatering dat gassen zich willen verspreiden in de ruimte waarin ze zich bevinden. De corresponderende eigenschap van de deeltjes is dan dat ze met veel tussenruimte kras kras door elkaar bewegen en dus na enige tijd overal in de ruimte zullen zijn. Een eigenschap van een gas is zo inzichtelijk gemaakt (verklaard) met eigenschappen van de deeltjes in het deeltjesmodel.

Hieronder worden enkele didactische problemen verwoord die zich voordoen bij de boven geschetste aanpak, en enkele suggesties gegeven voor een oplossing.

Natuurverschijnselen en deeltjesverklaringen

Allereerst geeft bovenstaande aanpak een karikatuur van het modelleren in de natuurkunde. De betekenis van het woord modelleren staat omschreven in het woordenboek (zie figuur 284). In deze zin is er bij het deeltjesmodel geen sprake van modelleren. In welke zin dan wel?

In de natuurwetenschappen blijkt de overgang van een beschrijving van de natuurverschijnselen vanuit de waarneming naar een inzichtelijke beschrijving vanuit de theorie over het algemeen pas mogelijk na een moeizaam en langdurig denkproces. Vanuit het gezichtspunt van de theorie kunnen ineens een groot aantal beschreven verschijnselen begrepen worden in onderlinge samenhang, met een beperkt aantal concepten en regels uit de theorie. In het geval van faseovergangen kunnen verschijnselen als smelten, stollen, verdampen en condenseren begrepen worden uit de beweging van de moleculen van de stof.

Leerboeken suggereren vaak ten onrechte dat de overgang van beschreven verschijnselen naar het begrip van de theorie een soepele en vanzelfsprekende overgang is. Bovendien suggereren ze dat een enkel experiment al tot die stap kan leiden en een-op-een verbonden kan worden met eigenschappen van moleculen. In werkelijkheid zijn er vele experimenten gedaan met een schat aan

Taalgebruik

Model – In de moderne wetenschappelijke opvatting: empirische interpretatie van een mathematisch logisch systeem (dus van een set wiskundige vergelijkingen met beginvoorwaarden en randvoorwaarden).

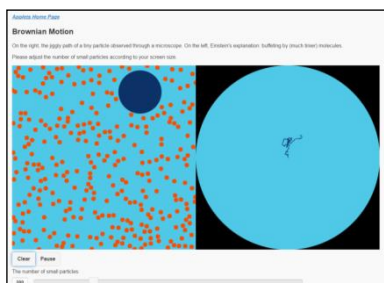
Deeltje – Klein deel of gedeelte.

Figuur 284 – De betekenis van de woorden model en deeltje volgens Van Dale – Groot woordenboek der Nederlandse taal.

beschreven verschijnselen voordat de overstap naar een nieuwe theorie werd gemaakt.

Vervolgens is het woord ‘deeltje’ erg verwarrend. Eigenlijk betekent het woord deeltje een klein deel of gedeelte, wat suggereert dat het deeltje nog steeds een stof is maar dan een heel klein beetje. We willen juist de notie aanbrengen dat in het deeltjesmodel een deeltje niet dezelfde eigenschappen als de stof heeft, maar dat de eigenschappen van de verzameling van deeltjes overeenkomen met de eigenschappen van een stof.

Verder wordt in de leerboeken vaak impliciet en veelvuldig overgeschakeld tussen een beschrijving vanuit de eigenschappen van een stof en een beschrijving vanuit de eigenschappen van de deeltjes (micro-macro denken), met als risico dat eigenschappen van de stof worden toegekend aan het deeltje en andersom.



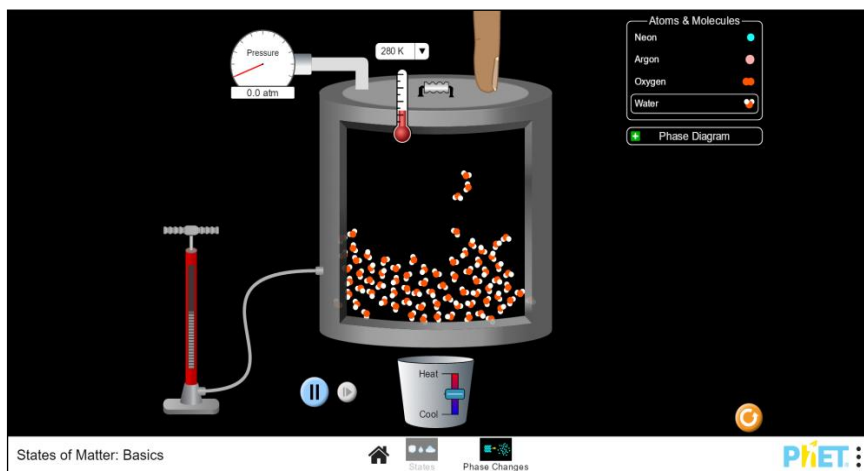
Figuur 285 – Schermbeeld van de computersimulatie ‘Brownian motion’.

Stofeigenschappen en molecuultheorie

Als instapprobleem voor het invoeren van moleculen kan gekozen worden voor de Brownse beweging. Toon het verschijnsel dat een rookdeeltje kris-kras beweegt, bijvoorbeeld met een computersimulatie als [Brownian motion](#) (zie figuur 285). De Brownse beweging is alleen te begrijpen door gebruik te maken van de voorstelling van een gas als bewegende moleculen die elastisch botsen.

Voor de behandeling van het deeltjesmodel als onderdeel van het onderwerp faseovergangen pleiten we voor de volgende kenmerken.

- De woorden *deeltje* en *model* worden niet meer gebruikt. In plaats hiervan wordt gebruik gemaakt van de woorden *molecuul* en *theorie*. Een molecuul is opgebouwd uit atomen die we ons voorstellen als harde bolletjes. Als analogie voor het botsen van moleculen tegen elkaar en de wand kunnen we het biljart gebruiken. Een computersimulatie als [Molecular motion](#) met bewegende en botsende bolletjes geeft ook een duidelijke voorstelling (zie figuur 286). Een trilmachine met fietskogeltjes is een redelijk alternatief, maar de aandacht wordt afgeleid door het feit dat je ziet dat er van buitenaf energie moet worden toegevoerd om de beweging van de fietskogeltjes in stand te houden.



Figuur 286 – Schermbeeld van de computersimulatie ‘Molecular motion’.

- De stoffen en faseovergangen worden eerst vanuit het rechtstreeks waarneembare beschreven, zowel de praktijkvoorbeelden uit de dagelijkse omgeving als de geschematiseerde voorbeelden uit het laboratorium. Dit leidt tot een in figuur 287 weergegeven samenhangende verzameling van stofeigenschappen, rechtstreeks gekoppeld aan het waarneembare. Bij de behandeling daarvan moet echter wel rekening worden gehouden met de in figuur 288 weergegeven leerlingdenkbeelden.

Eigenschappen van stoffen

- Een gas is samendrukbaar, verspreidt zich in de ruimte, mengt met andere gassen, kan kracht uitoefenen. Van een gas neemt de druk toe als je het samenperst, maar ook de

Leerlingdenkbeelden

- Bij faseovergangen is geen sprake van iets als massabehoud.
- Een gas heeft geen gewicht (of heeft minder gewicht dan de stof waaruit het verdampt is).
- De bubbels in kokend water bevatten lucht.
- Het water aan de buitenkant van een koud glas komt daar terecht via diffusie van binnenuit door de glaswand.
- Warmte (en ook koude) is een soort vloeistof, een substantie.
- Verwarmen betekent altijd dat de temperatuur stijgt. Ook bij kokend water blijft de temperatuur stijgen als je blijft verwarmen.
- Temperatuur is een mix van warmte en koude.
- Temperatuur is een stofeigenschap: sommige materialen zijn kouder dan andere.

Figuur 288 – Mogelijke leerlingdenkbeelden rond stoffen en faseovergangen.

Leerlingdenkbeelden

- De kleinste deeltjes van een stof hebben dezelfde macroscopische eigenschappen als die stof, inclusief bijvoorbeeld kleur.
- De deeltjes in een gas of vloeistof bewegen met dezelfde snelheid. In een vaste stof staan ze stil.
- Bij verwarmen worden de moleculen groter.
- Vacuüm bestaat niet, of trekt aan materialen in de buurt om zich te vullen.
- Tussen moleculen zit lucht (of iets anders: zuurstof, materie).

Figuur 290 – Mogelijke leerlingdenkbeelden rond moleculen.

temperatuur. Van een gas neemt de druk toe als je de temperatuur verhoogt.

- Een vloeistof is niet samendrukbaar, je kunt het schenken en laten uitvloeien, het vormt druppels, het kan krachten doorgeven in alle richtingen. De meeste vloeistoffen zetten uit bij verwarmen en krimpen bij afkoelen.
- Een vaste stof is niet samendrukbaar, vanuit zichzelf behoudt het zijn vorm, je kunt het in stukken verdelen. De meeste vaste stoffen zetten uit bij verwarming en krimpen bij afkoelen.
- Een vaste stof zoals ijs gaat smelten als je warmte toevoert. Tijdens het smelten is de temperatuur constant; daarna kun je de vloeistof verder verwarmen totdat de vloeistof gaat koken en verandert in een damp of gas.
- Bij de omgekeerde weg komt bij condenseren en stollen warmte vrij; dit is evenveel als op de heenweg was opgenomen.
- Eigenschappen van een stof zijn onder andere: temperatuur, volume, massa, hardheid, kleur, smaak, geur ...

Figuur 287 – Een samenhangende verzameling van waarneembare stofeigenschappen.

- De molecuultheorie wordt als een samenhangende voorstelling gebracht, zoals weergegeven in figuur 289. Daarbij wordt niet gesuggereerd dat die voorstelling rechtstreeks en logisch volgt uit de waarnemingen. Wel is het zo dat geordende waarnemingen nodig waren om een nieuwe voorstelling te ontwikkelen. Ook bij de behandeling van deze molecuultheorie moet rekening worden gehouden met leerlingdenkbeelden zoals in figuur 290.

Eigenschappen van moleculen

- Een stof is een verzameling moleculen. Moleculen zijn een of meerdere atomen die aan elkaar vast zitten. Atomen mogen we ons voorstellen als harde bolletjes.
- In een gas bewegen de moleculen kris-kras door elkaar; ze botsen tegen elkaar en tegen de wand en veranderen voortdurend van snelheid. Bij de botsingen gaat geen energie verloren, dus de moleculen blijven in beweging. Tussen de moleculen in een gas is een grote tussenruimte. Bij ideale gassen trekken de moleculen elkaar niet aan. Als ze botsen met elkaar of met de wand dan is er een grote afstotende kracht.
- In een vloeistof zitten de moleculen tegen elkaar aan, maar ze kunnen wel langs elkaar heen bewegen. De moleculen trekken elkaar aan en het kost moeite ze uit elkaar te halen. Om van een vloeistof een gas te maken moet je dus de vloeistof verwarmen.
- In een vaste stof zitten de moleculen op een vaste plaats; ze trillen om hun evenwichtsstand. Dit betekent dat de moleculen samen een star geheel vormen. Bij verwarmen gaan de moleculen zo hard trillen dat ze los komen van hun vaste plaats en langs elkaar kunnen gaan bewegen; het is dan een vloeistof geworden.

Figuur 289 – Een samenhangende verzameling van niet-waarneembare eigenschappen van moleculen.

- De samenhangende groep van eigenschappen van de stof wordt inzichtelijk beschreven vanuit de samenhangende voorstelling van een verzameling moleculen.

Stofeigenschappen en molecuultheorie

- Een gas is samendrukbaar vanwege de grote tussenruimte tussen de gasmoleculen; een vloeistof en een vaste stof zijn dat niet of nauwelijks vanwege het dicht op elkaar zitten van de vloeistof- en vaste-stof-moleculen.
- De druk van een gas kunnen we ons voorstellen als het voortdurend botsen van gasmoleculen tegen de wand van de ruimte waarin het gas zit.
- Temperatuur komt overeen met de gemiddelde bewegingsenergie van de moleculen. Verwarmen van een stof betekent dat de moleculen harder gaan bewegen. De toegevoerde warmte wordt omgezet in bewegingsenergie van de moleculen. Bij smelten en verdampen blijft de temperatuur constant maar neemt het volume toe. De toegevoerde warmte wordt omgezet in vanderwaalsenergie (plaatsenergie ten gevolge van de onderlinge elektrische krachten).

Figuur 291 – De koppeling tussen stofeigenschappen en de molecuultheorie.

Bovenstaande overwegingen geven aanwijzingen voor een leerstofopbouw waarin rekening wordt gehouden met de werkelijkheidsgerichte didactiek die gekenmerkt wordt doordat het leerproces begint en eindigt in de werkelijkheid van de

dagelijkse omgeving (zie figuur 292 en 293), en waarin aandacht wordt besteed aan het onderscheiden van vier beschrijvingsniveaus: beschrijven van praktijkvoorbeelden uit de dagelijkse omgeving vanuit de waarneming, beschrijven van schematische voorbeelden uit het laboratorium vanuit de waarneming, inzichtelijk beschrijven vanuit wetmatigheden voor stoffen en inzichtelijk beschrijven vanuit wetmatigheden voor moleculen (zie figuur 294).

Drieluik: IJs, water en waterdamp

Praktijksituatie



Het water verdampst en het zout blijft achter.



Waterval.



Gletsjer.

Laboratoriumsituatie



Kokend water.

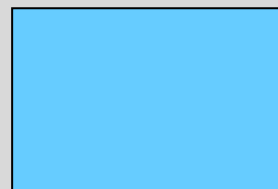


Kraanwater.

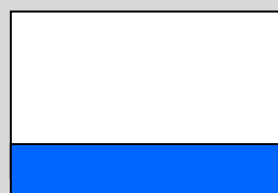


Ijsblokje.

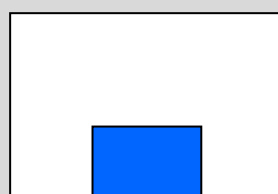
Theoriesituatie



Een gas verspreidt zich in het vat. Een gas heeft geen vaste vorm en geen eigen volume.



Een vloeistof vult de bodem van het vat. Een vloeistof heeft een eigen volume maar geen eigen vorm.



Een vaste stof staat op de bodem van het vat. Een vaste stof heeft een eigen volume en een eigen vorm.

Figuur 292 – Suggesties voor een leerstofopbouw die start vanuit de dagelijkse omgeving.

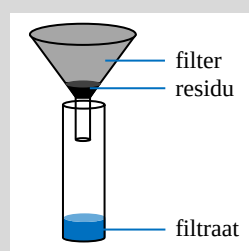
Drieluik: Filtreren

Praktijksituatie



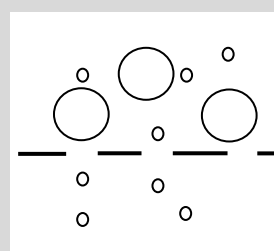
Het aquariumfilter zorgt voor schoon water.

Laboratoriumsituatie



Een filter maak je van een rond papierje en een trechter.

Theoriesituatie



Bij filtreren kunnen de grote deeltjes niet door het filter en de kleine wel.

Figuur 293 – Voorbeeld van de koppeling tussen de dagelijkse praktijk en de theorie via een laboratoriumsituatie.

Leer- jaar	Beschrijven van de praktijkvoorbeelden uit de dagelijkse omgeving	Beschrijven van de schematische voorbeelden in het laboratorium	Inzichtelijk beschrijven met wetmatigheden voor stoffen	Inzichtelijk beschrijven met wetmatigheden voor moleculen
		oriënteren toepassen	verwerven verwerken	verwerven verwerken
2	Neerslag: hagel, sneeuw, regen, mist IJs in het vriesvak Condens in de badkamer IJs op de autoruit Centrale verwarming Luchtstromen en klimaat Luchtstromen en binnenklimaat	Proefjes: • smelten van ijs tot water • verdampen van water op een horlogeglas • fluitketel met glasplaat in de stoom Proefjes: • stroombuis • luchtstroomspiraal • geleidingskruis • gloeilamp	Stoffen • gassen • vloeistoffen • vaste stoffen Verschillen wat betreft • vormbehoud • volumebehoud Faseovergangen • smelten en stollen • verdampen en condenseren • vervluchtigen en rijpen Warmtetransport • materiële stroming • stofgeleiding • straling	Moleculen zijn opgebouwd uit atomen die je mag voorstellen als kleine harde bolletjes Eigenschappen: • kleine harde bolletjes • bewegen kris-kras door elkaar • botsen met elkaar en de wand • blijven in beweging Warmtetransport: • bewegende moleculen verplaatsen zich • bewegende moleculen geven beweging aan elkaar door • geen rol voor moleculen
3	Thermoskan Spouwmuurisolatie	Opstellingen met • joulemeter • temperatuurmeter bij faseovergangen	Warmtetoevoer en -afvoer bij faseovergangen $Q = m \cdot c \cdot \Delta T$ $Q = m \cdot r_{s,v}$ $Q_{in} = Q_{uit}$ Warmte-isolatie en temperatuurevenwicht $Q_{in} \text{ en } Q_{uit} \leftrightarrow \Delta T$	De moleculen hebben twee soorten energie: • bewegingsenergie $E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$ • plaatsenergie E_{vdW} De temperatuur van een stof is evenredig met de gemiddelde kinetische energie van de moleculen De vanderwaalsenergie hangt samen met de elektrische kracht tussen moleculen vanwege aanwezige dipolen

Figuur 294 – Suggesties voor een leerstofopbouw met aandacht voor het voor het onderscheiden van de verschillende beschrijvingsniveaus.

6.7 Licht en beeldvorming

In deze paragraaf schetsen we een leerlijn ‘licht en beeldvorming’ voor het tweede en derde leerjaar. Gestart wordt met het begrip ‘zichtlijn’ dat ook in de wis-kunde wordt gebruikt. Veel aandacht wordt besteed aan lichtbundels en licht-stralen als basis om de beeldvorming bij spiegels en lenzen te begrijpen. Speciale aandacht wordt gegeven aan mogelijke begripsproblemen bij leerlingen en aan suggesties om deze te voorkomen.

Het begrip ‘zien’ komt in allerlei variaties aan de orde, zoals het zien van lichtbundels of het zien van gekleurde voorwerpen. De natuurkundige beschrijving van het zien van voorwerpen komt relatief laat in de leerlijn.

Zichtlijnen

Als je een voorwerp ziet, kun je een rechte lijn trekken van je oog naar het voorwerp. Deze lijn heet een zichtlijn. Voorwerpen achter een ondoorzichtig voor-

werp zie je niet. Kijk je door de opening van een raam of een openstaande deur dan heb je een beperkt gezichtsveld. Het gezichtsveld wordt begrensd door de zichtlijnen langs de rand van de opening. Om een hoekje kun je niet kijken, tenzij je een spiegel gebruikt.

Aandachtspunten – Leerlingen denken soms dat ogen licht geven en dat er een lichtbundel vanuit het oog naar het te bekijken voorwerp gaat. Het idee van zichtlijn sluit aan bij kijken als activiteit van het oog. In een later stadium wordt duidelijk dat het licht van het voorwerp naar het oog gaat en niet andersom.

Lespraktijk

Een leraar heeft een koker over een lamp gezet en het lokaal verduisterd. Op het plafond is een grote ronde lichtvlek te zien. Tot verbazing van de leerlingen zie je geen lichtbundel. Wel is licht te zien aan de bovenrand van de koker. Als de leraar een vel papier in de lichtbundel houdt, zie je wel licht. Ook met wat stof wordt de lichtbundel zichtbaar. Onderzoek aan de lichtbundel laat zien dat het een kegelvorm is met rechte zijanten.

De leraar vervolgt met de vraag waar je de lichtbron kunt zien en waar niet. Het blijkt dat je de lichtbron kan zien als je je hoofd in de lichtbundel houdt. Er is dan een zichtlijn van oog naar lamp. Je wordt dan verblind door het licht van de lichtbron.

Het klassengesprek wordt afgesloten met een discussievraag: “De zon schijnt op een raam. Waarom is het dan overal in de kamer licht?”

Figuur 295 – Demonstratie van de eigenschappen van licht.

Lichtbundels

Met de demonstratie in de in figuur 295 geschetste lespraktijk worden drie belangrijke eigenschappen van licht duidelijk. Allereerst: een lichtbundel zie je niet. Dat is anders dan veel leerlingen denken. Zij zien wel lichtbundels op plaatjes van schijnwerpers, zaklampen en vuurtorens. De lichtbundel wordt pas zichtbaar als het licht op een voorwerp valt: het plafond, de rand van de koker of het stof in de lichtbundel. Kennelijk moet het licht weerkaatst worden naar je oog om gezien te worden. Een tweede eigenschap van licht is dat een lichtbundel rechte grenslijnen heeft die lopen van de lamp via de kokeropening naar het plafond. En ten slotte: je ziet een lichtbron als licht van de lichtbron rechtsreeks in je oog valt.

Schaduw

In de in figuur 296 geschetste lespraktijk spelen twee belangrijke eigenschappen van licht een rol. Allereerst: je vindt de schaduw door de grenslijnen te trekken van de lichtbron langs het voorwerp tot de schaduwplek. Het hele gebied achter het voorwerp is schaduw. Dat is meer dan de schaduw die je ziet op de grond of de muur. Ten tweede: als je in de schaduw zit, zie je de lichtbron niet. Die lichtbron zit achter het voorwerp dat de schaduw maakt. Voor leerlingen is nieuw dat je de lichtbron niet ziet in de schaduw.

Lespraktijk

Een leraar start de les over schaduw met de volgende situatie. Op een zomerse dag staat de zon halfhoog aan de hemel en je bent buiten op zoek naar schaduw. Waar vind je de schaduw? Eindelijk heb je een schaduwplekje gevonden onder een boom. Teken de zon, de boom en het schaduwplekje. Kun je de zon nog zien op je schaduwplekje?

Tijdens de les worden de volgende voorbeelden gebruikt: lopen langs een lantaarn, schimmenspel, beschermen tegen de zon, en een potlood onder een TL-buis.

Het klassengesprek wordt afgesloten met een discussievraag: “Op een bewolkte dag is er geen schaduw. Hoe komt dat?”

Figuur 296 – Demonstratie van de eigenschappen van licht en schaduw.

Spiegels en lichtbundels

Uit de in figuur 297 geschetste lespraktijk blijkt dat de spiegel het licht van de zon in een gerichte bundel weerkaatst. En gek genoeg is de lichtvlek niet rechthoekig. Verder blijkt dat je het zonlicht weerkaatst door het spiegeltje schuin in de lichtbundel te houden. Dit is nader te onderzoeken met een smalle lichtbundel of lichtstraal die je op de spiegel laat vallen, zoals in het drieluik van figuur 298. Dan blijkt dat de hoek van inval i gelijk is aan de hoek van terugkaatsing t , soms ten onrechte hoek van uitval genoemd. In vervolg daarop kan ook de terugkaatsing van licht door een holle spiegel aan de orde komen, zoals in het drieluik van figuur 299.

Lespraktijk

Op een zonnige dag schijnt de zon in het lokaal. De leraar geeft de leerlingen kleine rechthoekige zakspiegeltjes, met de vraag of ze alle wanden van het lokaal kunnen beschijnen.

Na heel wat spelen met de spiegeltjes blijkt dat de wand tegenover het raam het moeilijkst te beschijnen is. Met twee spiegeltjes lukt het wel.

Figuur 297 – Demonstratie van de terugkaatsing van licht.

Leerlingdenkbeelden

- Bij het zien van een voorwerp lopen er lichtstralen vanuit het oog naar het voorwerp.
- Als het helemaal donker is kun je voorwerpen wel zien, als je maar lang genoeg wacht.
- Het licht van een lichtbron komt tot een bepaalde afstand en stopt dan geheel. Deze afstand hangt af van de helderheid van de lichtbron, en of het dag of nacht is.
- Een schaduw is 'iets': een echt voorwerp of een donkere reflectie van een voorwerp.
- Lichtstralen kunnen de hoek om buigen: als zonlicht naar binnen valt, kan het de hele kamer verlichten.
- Laserstralen zijn rechtstreeks waarneembaar (dat er stofdeeltjes in de lucht nodig zijn, wordt niet opgemerkt).
- De kleur van een voorwerp wordt bepaald door het voorwerp, en niet door het licht dat op het voorwerp invalt.
- Licht kaatst alleen terug op een spiegel en een glad oppervlak, niet op een ruw oppervlak.

Figuur 301 – Mogelijke leerlingdenkbeelden rond licht en zien.

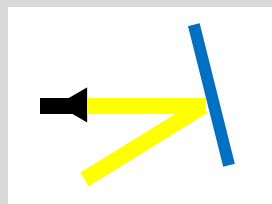
Drieluik: Een discobal

Praktijksituatie



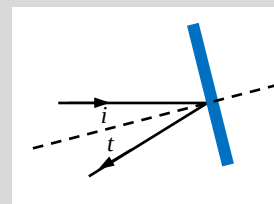
Een discobal weerkaatst het licht.

Laboratoriumsituatie



De vlakke spiegel weerkaatst de lichtbundel.

Theoriesituatie



Een lichtstraal weerkaatst volgens hoek van inval = hoek van terugkaatsing.

Figuur 298 – Drieluik over de weerkaatsing van licht op een vlakke spiegel.

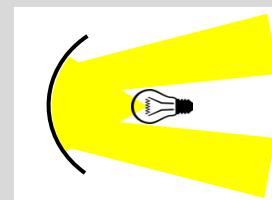
Drieluik: Een lamphouder

Praktijksituatie



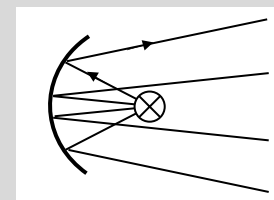
De lamphouder weerkaatst het achterwaartse licht naar voren.

Laboratoriumsituatie



De holle spiegel convergeert de divergente lichtbundel.

Theoriesituatie



Een lichtstraal weerkaatst volgens hoek van inval = hoek van terugkaatsing.

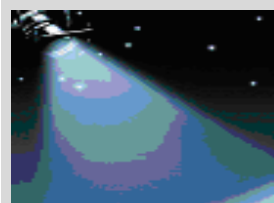
Figuur 299 – Drieluik over de weerkaatsing van licht op een holle spiegel.

Lenzen en lichtbundels

Schijnwerpers worden in het theater gebruikt. Maar hoe krijg je zo'n mooie gerichte lichtbundel? Dat wordt duidelijk uit het drieluik van figuur 300 over de breking van licht door een bolle lens.

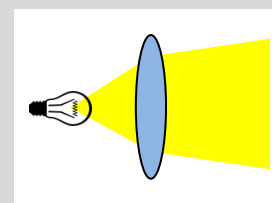
Drieluik: De schijnwerper

Praktijksituatie



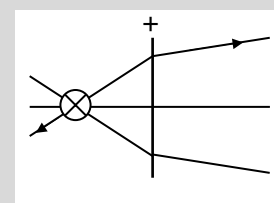
De schijnwerper geeft een gerichte lichtbundel.

Laboratoriumsituatie



De bolle lens convergeert de divergente lichtbundel.

Theoriesituatie



De bolle lens breekt de lichtstraal naar het midden van de lens.

Figuur 300 – Drieluik over de breking van licht door een bolle lens.

Aandachtspunten – In het voorgaande is veel aandacht besteed aan lichtbundels en de invloed van spiegels en lenzen op een lichtbundel. Tegelijkertijd is de lichtstraal geïntroduceerd als een zeer smalle lichtbundel. Een lichtstraal kun je maken met een smalle spleet. Dit idee van een lichtstraal kan worden versterkt door te kijken naar een laser. Begrip van lichtbundels en lichtstralen is nodig als basis voor het verdere onderwijs over licht: de beeldvorming met spiegels en lenzen.

Licht en kleur

In het theater worden gekleurde lichtbundels gebruikt. Hoe maak je die? Met een

prisma kun je laten zien dat wit licht bestaat uit licht met alle kleuren van de regenboog. Laat je wit licht invallen op een kleurfilter, dan worden alle kleuren tegengehouden behalve de kleur van het filter.

Leerlingen weten uit eigen ervaring dat je de kleur van kleren soms beter buiten de winkel kunt bekijken dan binnen de winkel in kunstlicht. Ook auto's veranderen van kleur als ze verlicht worden door de gele natriumlampen van straatlantaarns. Dit kunnen ze beter begrijpen als ze weten dat voorwerpen licht absorberen en reflecteren. De kleur van het voorwerp die je ziet is de kleur van het gereflecteerde licht. Een witte lamp op een rood voorwerp geeft de rode kleur, maar een gele lamp op een rood voorwerp niet. Een afsluitende discussievraag kan zijn: "Wat is het verschil tussen het weerkaatsen van licht op een spiegel en op een vel wit papier?"

Zien

Het ligt voor de hand om leerlingen al eerder te vragen wanneer je een boek dat op tafel ligt kunt zien. De vragensteller wil vanuit een natuurkundig standpunt uitkomen bij het inzicht dat je een voorwerp alleen kunt zien als licht via het voorwerp in je oog komt. Leerlingen zeggen meestal dat je het boek kunt zien als je er naar kijkt, als er voldoende licht is, en als er niets tussen de waarnemer en het boek staat. Meestal dus een weinig vruchtbaar startpunt voor de ontwikkeling van het begrip 'zien'.

Het kijken naar gekleurde voorwerpen onder een gekleurde lamp lijkt een uitstekende situatie om het zichtconcept te introduceren. De weerkaatsing en absorptie van licht op het voorwerp gebruik je voor de verklaring van de kleur van gekleurde voorwerpen in gekleurd licht. Het zien van een voorwerp houdt kennelijk in dat licht via het voorwerp in je oog komt. Hoewel de situatie van het boek op tafel geen vruchtbare start oplevert voor begripsontwikkeling, is het wel geschikt om na te gaan of het zichtconcept begrepen is. En een discussievraag: "Kun je een wit vel papier zien in een aardedonkere kelder?"

Kijken in spiegels

Een leraar stelt de vraag in welke situaties je spiegels gebruikt om niet naar jezelf te kijken. De leerlingen noemen de autospiegel en de winkelspiegel bij de kassa. Spiegels gebruik je dan om achterom te kijken of om een hoekje te kijken.

Een mooie proef om de plaats van het spiegelbeeld te bepalen is een kaars voor een glazen ruit. In het spiegelbeeld kun je je vinger in de vlam houden of een bekerglas over het spiegelbeeld zetten. Het is duidelijk dat het spiegelbeeld even ver achter de spiegel zit als het voorwerp ervoor. Lichtstralen gaan van het voorwerp via de spiegel naar het oog, maar ze lijken te komen uit het beeld.

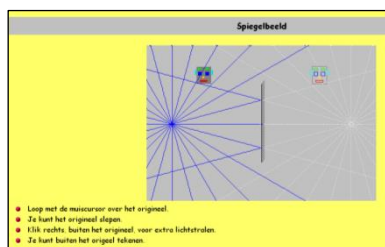
Leerlingen denken soms dat het spiegelbeeld op de spiegel zit. Teken met hen bijvoorbeeld de omtrek van je hoofd op de spiegel. Ook kun je laten zien dat je de persoon voor de spiegel moet verlichten en niet de spiegel. Discussievragen zijn onder andere: "Op welke afstand stel je scherp als je een foto van je spiegelbeeld maakt?", "Moet je jezelf of de spiegel verlichten als het donker is?", "Als je de omtrek van je hoofd als spiegelbeeld tekent, hoe ziet dat er dan uit?" en "Hoe groot moet een verticale passpiegel zijn om jezelf helemaal te zien?"

Camera obscura

Een spectaculaire camera obscura kan worden gemaakt door een lokaal te verduisteren en in de verduistering een klein rond gat aan te brengen. De buitenwereld wordt afgebeeld op de wand tegenover het gat. Leerlingen verbazen zich over de bewegende beelden en vragen zich af hoe het beeld gevormd wordt. De beeldvorming in een camera obscura kan begrepen worden met het begrip lichtstraal en dat je een beeld opbouwt uit allemaal kleine vlekken. Het verdient aanbeveling om te kijken (als demonstratie of als Youtube-film) wat er verandert als je het gat groter maakt of een andere vorm geeft, wat er gebeurt als je een dunne bolle lens voor het gat houdt, en waar het scherpe beeld dan ligt.

Lenzen en beeldvorming

In een camera wordt een voorwerp klein afgebeeld op een beeldchip. Bij een



Figuur 302 – Een computerprogramma kan een mooi hulpmiddel zijn bij het tekenen van de stralengang en het bepalen van de plaats van het beeld bij een vlakke spiegel.

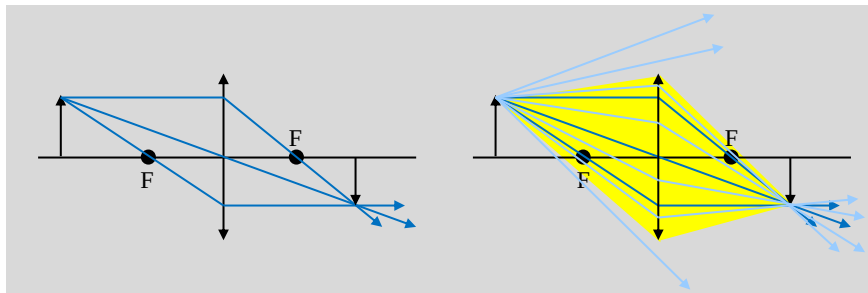
Leerlingdenkbeelden

- Het kunnen zien van het spiegelbeeld van een voorwerp hangt alleen af van de posities van de spiegel en het voorwerp, niet van de positie van de waarnemer.
- Hoe verder je van een spiegel af gaat staan, des te meer je van jezelf kunt zien.
- Het beeld in de spiegel bevindt zich als een afbeelding op het oppervlak van de spiegel (achter de spiegel is toch niets).
- Alle lichtstralen die op een lens invallen gaan door het brandpunt aan de andere kant van de lens.
- Het licht van een voorwerp gaat in zijn geheel door de lens, wordt daar omgedraaid en vergroot of verkleind en komt ten slotte als beeld op een scherm. Zonder scherm is er geen beeld.
- Bij beeldvorming met een lens is er altijd een scherp beeld: hoe groter de afstand tussen de lens en het scherm is, des te groter is het (altijd scherpe) beeld.
- Het beeld wordt altijd gevormd in het brandpunt van de lens.
- De grootte van het beeld hangt af van de diameter van de lens.
- Als een lens gedeeltelijk wordt afgedekt, zal hetzelfde deel van het beeld verdwijnen (of juist het tegenovergestelde deel omdat de lens boven en onder omwisselt).

Figuur 303 – Mogelijke leerlingdenkbeelden rond beeldvorming bij spiegels en lenzen.

beamer wordt de lcd-dia groot afgebeeld op een scherm. Leerlingen staan er van te kijken dat je een kaarsvlam met een bolle lens kunt afbeelden op de muur. Bijzonder is het bewegende beeld. Voor leerlingen is het goed om te zien dat het beeld onscherp wordt als je het scherm verplaatst. Ook kun je het beeld veranderen door de afstand tussen de kaars en de lens groter of kleiner te maken. De beeldvorming kun je construeren met de constructiestralen en berekenen met de lenzenformule.

Computersimulaties waarbij je kunt schakelen tussen lichtbundels en lichtstralen helpen bij leggen van een relatie tussen de loop van de lichtstralen en de beeldvorming. Bijpassende discussievragen zijn: “Hoe verandert het beeld als je de helft van de lens afdekt?” en “Op welke plaatsen kun je het scherm zetten voor een scherp beeld?”



Figuur 304 – De drie constructiestralen bij een bolle lens (links), als speciale gevallen van een veelheid aan lichtstralen in de (gele) lichtbundel die bij de beeldvorming betrokken is (rechts).

Beeld

Zowel bij de spiegel als bij de lens wordt het begrip ‘beeld’ geïntroduceerd vanuit de waarneming. Een spiegelbeeld staat even ver achter de spiegel als het voorwerp voor de spiegel staat. Vanuit het zichtconcept wordt een lichtstraal getekend vanuit het spiegelbeeld naar het oog en vanuit het voorwerp naar de spiegel. Dan blijkt de terugkaatsingswet voor een lichtstraal te gelden.

Aandachtspunten – De combinatie van lamp, lcd-dia en lens zorgt voor een afbeelding op het scherm. In eerste instantie noemen we dat wat je op het scherm ziet een beeld. Dat beeld kan scherp of onscherp zijn. Dat kun je instellen met de afstanden tussen voorwerp, lens en scherm. Pas later identificeren we vanuit een theoretisch standpunt een beeld met het snijpunt van lichtstralen. Dan is een beeld dus per definitie scherp.

Lenzenformule

Voor inzicht in de beeldvorming bij een bolle lens is het van belang enkele bijzondere situaties te onderscheiden wat betreft de voorwerpsafstand v , de beeldafstand b , de brandpuntsafstand f en de vergroting N . Deze situaties zijn weergegeven in figuur 305.

$\frac{1}{f} = \frac{1}{b} + \frac{1}{v}$ $S = \frac{1}{f}$		$N = b/v$	Voorbeeld
v groot	$b \approx f$	klein	camera
$v > 2 \cdot f$	$f < b < 2 \cdot f$	$N < 1$	camera
$v = 2 \cdot f$	$b = 2 \cdot f$	$N = 1$	
$f < v < 2 \cdot f$	$b > 2 \cdot f$	$N > 1$	projector
$v \approx f$	b groot	groot	projector
$v < f$	geen beeld	geen beeld	

Figuur 305 – Te onderscheiden situaties bij de beeldvorming met een bolle lens.

De juiste getallen invoeren in een formule en komen tot het juiste antwoord betekent lang niet altijd dat de leerling natuurkundig inzicht heeft in de berekende

situatie. Daarom is het goed ook naar globale verbanden te vragen: “Hoe verandert de ene grootheid als ik de andere grootheid verander?” Dat kan bijvoorbeeld in de volgende situaties.

- Met het oog scherp stellen op een voorwerp dat verder weg staat. Beeldafstand b is vast en v groter, dus f groter, dus lenssterkte kleiner (lens platter): veraf kijk je met een platte ooglens. Beeldafstand b is vast en v groter, dus N kleiner: een voorwerp veraf zie je kleiner.
- Bij een projector het scherm verder weg zetten. Brandpuntsafstand f vast en b groter, dus v kleiner, dus N groter: voor een groter beeld zet je het scherm verder weg.
- Met een camera scherp stellen op een voorwerp verder weg. Brandpuntsafstand f vast en v groter, dus b kleiner, dus N kleiner: een voorwerp verder weg staat kleiner op de foto.

Aandachtspunten – Rekenen met de lenzenformule is voor leerlingen lastig vanwege het rekenen met breuken door de inversen in de formule. Bij eenvoudige getallen kun je berekeningen uitvoeren door de breuken gelijknamig te maken en de inverse te berekenen door teller en noemer om te draaien. Leerlingen vinden het rekenen met breuken lastig. Dat je teller en noemer met hetzelfde getal mag vermenigvuldigen is meestal voor hen een mysterieuze truc. Ook het omdraaien van teller en noemer om de inverse te berekenen is voor hen moeilijk in te zien.

Rekenen met de rekenmachine levert vaker een goed antwoord. Leerlingen gebruiken de deelttoets [$\div$] en de inversetoets [$1/x$]. Dan reken je $1/f$ uit met $(1[\div]b) + (1[\div]v)$, en reken je f uit door hiervan de inverse te nemen [$1/x$].

6.8 Afsluiting

De centrale vraag voor dit hoofdstuk was: hoe is de begripsontwikkeling van leerlingen – gezien het karakter van de mogelijke leerlingdenkbeelden en didactische benaderingen – in de verschillende leerstofdomeinen te stimuleren?

Een antwoord op deze vraag is allereerst het herkennen en erkennen van de mogelijke leerlingdenkbeelden in een bepaald leerstofdomein, en het daarop anticiperen door het aan de orde stellen van praktijksituaties, het stellen van vragen en het voorleggen van opgaven die die denkbeelden – indien aanwezig bij (een deel van) de leerlingen – oproepen en daarmee bespreekbaar maken. Bij dat oproepen en bespreken kan gebruik worden gemaakt van instapproblemen en drieluiken (die de verbinding leggen tussen praktijk-, laboratorium- en theorie-situaties) en van checkvragen, discussievragen en concept maps (zie hoofdstuk 2). Of, met andere woorden: onderwijsleeractiviteiten die het denken van leerlingen zichtbaar maken (al dan niet aansluitend op al bekende leerlingdenkbeelden) en waarop direct feedback te geven is aan de individuele leerling.

Een tweede antwoord op deze vraag is het zorgen voor een zorgvuldige leerstofopbouw binnen elk van de leerjaren en over de opeenvolgende leerjaren heen. De mogelijkheden daarvoor zijn echter beperkt: de leerstofopbouw, zeker die over de leerjaren heen, wordt voor een groot deel bepaald door het op school gebruikte leerboek. Toch is het voor de begripsontwikkeling van de leerlingen van groot belang dat de begripsvorming in eerste instantie gericht is op verheldering van de praktijktoepassingen uitgaande van de omgangstaal, en later steeds meer gericht is op een opbouw van de vaktheorie met een veel preciezere vaktaal. Daarbij zoek je naar onderwijsleeractiviteiten die bij leerlingen de behoefte oproepen om een verschijnsel te verklaren, eerst concreet en informeel in alledaagse taal en daarna abstract en formeel in vaktaal. Een dergelijke leerstofopbouw kun je zien als een aanvulling op het in paragraaf 2.8 genoemde vijftal *leerprincipes* uit de leerpsychologie: *opbouwen*.

Opbouwen – Laat de kennisverwerving van de leerlingen plaatsvinden in een zorgvuldig doordachte leerstofopbouw van concreet en contextspecifiek naar abstract en meer algemeen binnen elk leerjaar en over de leerjaren heen.