

3. Energie vergaat niet

Energie is een woord dat we veel gebruiken en een belangrijke rol speelt in ons dagelijks leven. Denk maar aan de hoge energie brandstofprijzen, de energiecrisis, de invloed van energie op de geopolitiek en op het klimaat ... Het is dan ook heel belangrijk dat je goed begrijpt hoe wetenschappers dit concept juist invullen. Als toekomstige leerkracht moet je ook een goed zicht hebben op de meest voorkomende denkbeelden die leerlingen over energie hebben en weten hoe je daarop kan inspelen. Daarbij komt dat energie een STEM concept is en dus de verschillende wetenschappelijke disciplines met elkaar verbindt. Ook binnen de fysica komt het terug als een soort lijm die de verschillende fysica thema's (vb. mechanica, elektriciteit, warmteleer ...) bij elkaar houdt. De energiebril opzetten helpt om de wereld als een samenhangend geheel te zien, los van de complexe processen die zich daaronder allemaal afspelen.

Laad jezelf dus maar op voor een diepgaande verkenningstocht.

3.1 Denkbeelden over energie



Opdracht

Hoe kijk jij naar energie?

We hebben allemaal een beeld over het begrip energie. Via de online vragenlijst (op www.wooclap.com/ENERGIEATARTEVELDE) word je uitgedaagd om op basis van jouw inzichten in energie, de energieinhoud van verschillende voorwerpen met elkaar te vergelijken. **Vul de vragenlijst in voordat je het hoofdstuk doorneemt.**



Figuur 63: Openingsbeeld van de online bevraging op wooclap.

De manier waarop jongeren naar energie kijken is grondig onderzocht (Kuhnová, 2020; Millar, 2005; Sherman, 1986). De vragenlijst uit bovenstaande opdracht is bedoeld om de meest voorkomende denkbeelden in een groep zichtbaar te maken. Op Canvas vind je onder Modules/Energie de gemiddelde resultaten van de bevraging samen met de meest voorkomende argumenten. Deze resultaten maken duidelijk dat er in de meeste groepen veel denkbeelden over energie zijn die niet volledig wetenschappelijk zijn. Men spreekt dan van leerlingendenkbeelden of preconcepten. We zetten hier de meest voorkomende preconcepten op een rijtje.

1. Enkel levende wezens hebben energie;
2. energie = kracht en beweging;
3. energie = brandstof, vloeistof;
4. elektriciteit = energie;
5. energie veroorzaakt veranderingen.

Veel mensen associëren energie met levende wezens of met vitaliteit (preconcept 1). Men maakt dan nogal snel de conclusie dat een dood dier zijn 'levensenergie' heeft verloren. Nochtans is dit denkbeeld gemakkelijk met tegenvoorbeelden te 'debunkten'. Zo goed als al onze energiebronnen (fossiele brandstoffen, water, zon ...) zijn opgebouwd uit dode materie en een dode olifant is een rijke energiebron voor de opruimers van de natuur.

Energie wordt heel gemakkelijk met kracht verward of met beweging (preconcept 2). Toch is een kracht geen energie maar een interactie tussen twee objecten uitgeoefend van het ene object op het andere. Het is wel zo dat je via externe krachten energie in een systeem kan steken (vb. door een steen op een bepaalde hoogte te plaatsen, of twee magneten uit elkaar te trekken ...), maar die kracht is niet hetzelfde als de energie.

Er kan gerust energie in een systeem zijn zonder dat er een (netto) kracht aanwezig is, denk maar aan een horizontaal rollende bal. Of andersom grote krachten kunnen de energie van het systeem onveranderd laten. Als je tegen een stevige muur duwt, gaat de energie van die muur niet significant veranderen. Hetzelfde geldt voor beweging. Een lichaam in beweging bevat inderdaad een hoeveelheid energie, maar een stilstaand voorwerp kan ook energie bevatten.

In het dagelijks leven wordt energie nogal gemakkelijk geassocieerd met vloeibare brandstoffen (preconcept 3). Energie wordt dan iets dat zich als een vloeistof gedraagt, ook wetenschappers spreken dikwijls over de energiestroom. Op zich is dit beeld niet volledig foutief en het kan leerlingen helpen om dit abstracte begrip te plaatsen, maar energie is zeker geen vloeistof. Je kan hoogstens zeggen dat het zich soms gedraagt zoals een vloeistof.

Elektriciteit wordt heel gemakkelijk geassocieerd met energie (preconcept 4). Dit is zeker niet volledig ten onrechte. Elektrische verschijnselen zijn net als alle andere verschijnselen gekoppeld aan energieverplaatsingen. Maar deze koppeling veroorzaakt nogal snel de nodige begripsverwarring. De elektrische stroom wordt heel gemakkelijk verward met een energiestroom, terwijl het in feite een materiële stroom is (van geladen deeltjes), en de elektrische spanning zegt niet hoeveel energie er aanwezig is, wel hoeveel energie 1 Coulomb lading (de eenheid van lading) zou hebben op een bepaalde positie. Een geladen ballon heeft al snel een spanning van duizenden Volt, maar er zit zo weinig lading op zodat de energie-inhoud verwaarloosbaar is.

Een laatste denkbeeld is dat energie de oorzaak is voor veranderingen (preconcept 5). Maar ook hier speelt elk woord een rol. Energie veroorzaakt de veranderingen zelf niet. Het is niet zo dat als je veel energie ergens samenbrengt, je noodzakelijkerwijze een grote verandering zal hebben. Zo zal het water in een stuwmeer geen veranderingen teweegbrengen zolang het meer goed afgesloten blijft. Maar als de dijk breekt, dan zijn de gevolgen natuurlijk catastrofaal. Veranderingen worden doorgaans veroorzaakt door concentratieverschillen van materie en/of energie. Het begrip entropie speelt dan een rol en het systeem zal deze entropie maximaliseren. Maar zo ver gaan we doorgaans niet in het secundair onderwijs. Jammer, want dit is eigenlijk een razend interessant onderwerp (Giancoli, 2017).



Oefening

Leerlingen hebben eigen denkbeelden over energie die niet overeenkomen met de wetenschappelijke denkbeelden (de preconcepten). Deze denkbeelden zijn echter vrij hardnekkig en zullen enkel vervangen worden door meer wetenschappelijke ideeën als de status van de preconcepten verlaagd wordt (Posner, 1982).

Bedenk voor veel gebruikte foutieve argumenten van de bevraging van de beginopdracht van dit hoofdstuk (zie Canvas) sterke tegenargumenten, tegenvoorbeelden of experimenten die leerlingen duidelijk maken dat hun argument een doodlopend spoor is.

3.1.1 Wat is energie ?

Energie is een niet iets wat je kan zien, waarnemen, vasthouden. Je kan energie niet isoleren, het is geen object, het is geen fysieke entiteit. Richard Feynman geeft in zijn befaamde 'lectures on physics' het volgende antwoord op de vraag 'Wat is energie?' (R. P. Feynman et al., 1963) *It is important to realize that in physics today, we have no knowledge of what energy 'is'.*

Strikt wetenschappelijk kan je niet zeggen wat energie juist is, maar je kan wel beschrijven hoe het concept juist werkt en de wereld mee vorm geeft. Wetenschappers hebben ontdekt dat de energie van een systeem een grootte is die we kunnen berekenen of meten en waarvan we zeker weten dat deze energie niet verdwijnt tijdens veranderingen of processen en er kan ook geen energie zomaar uit het niets verschijnen⁷. **De energie kan zich enkel verplaatsen, de totale hoeveelheid energie van het systeem en zijn omgeving blijft behouden.**

Wetenschappers weten dus heel goed hoe energie werkt, maar niet wat het juist is. Dit voelt misschien wat vreemd aan, maar hetzelfde geldt voor een heleboel concepten uit de fysica. We weten ook niet juist wat de zwaartekracht is, maar we kunnen wel nauwkeurig voorspellen hoe die zal inwerken op voorwerpen. We weten niet juist wat een elektron is, we twijfelen er zelf over of het een deeltje is of een golf, maar ook hier weten we wel heel nauwkeurig hoe deze 'vage' elektronen de atomen hun vorm en eigenschappen geven. Kortom, niet weten wat een concept juist is, hoeft geen belemmering te zijn om dit concept te gebruiken in de modellen die we van de wereld rondom ons maken. Zolang we maar een wiskundig model hebben van dit concept en kunnen meten/berekenen hoe dit concept in interactie staat met de fysieke wereld.

In de eerste graad van het secundair onderwijs is het onmogelijk om het begrip energie wiskundig te definiëren. Daarom maakt men gebruik van vereenvoudigde definities. Hieronder enkele voorbeelden uit handboeken:

- Biogenie 1: *'Energie is wat er nodig is om iets te kunnen doen. Energie is de mogelijkheid om arbeid te verrichten.'*
- Hoezo 2: *'Energie is een maat voor mogelijke veranderingen.'*
- NW voor jou: *'Energie is nodig om te functioneren.'*

⁷ Er is tot heden geen enkel experiment gevonden die de vaststelling dat de energie behouden blijft, tegenspreekt. Men spreekt daarom terecht van 'de wet van behoud van energie'.

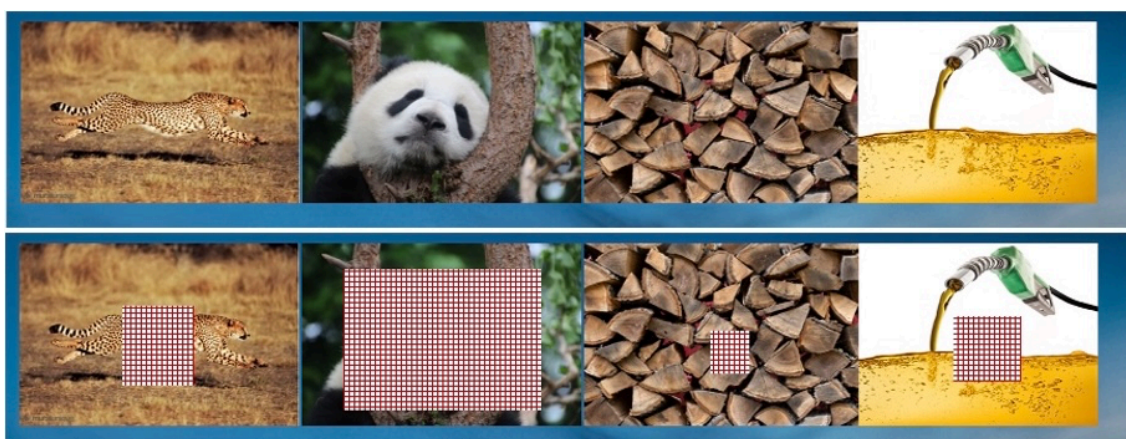
Bemerk dat deze definities vrij vaag blijven en eigenlijk ook niet zeggen wat energie juist is. Energie wordt gekoppeld aan veranderingen, maar het is duidelijk niet zo dat het zelf voor de veranderingen zorgt (zie ook preconcept 5). Het is enkel een voorwaarde voor veranderingen of processen. Het is daarom dat energie dikwijls als 'een mogelijkheid' wordt gedefinieerd. Energie wordt in meer gevorderde handboeken fysica gekoppeld aan het begrip arbeid (Giancoli, 2017) maar voor de eerste graad is dit eigenlijk het probleem verleggen, want dan moet je eerst het begrip arbeid nauwkeurig definiëren en duidelijk maken waarom arbeid en energie zo sterk gekoppeld zijn (zie 3.7 Arbeid en vermogen).

Vermits de 'Wat is energie?'-vraag niet echt kan beantwoord worden is, is het dan ook niet zinvol om te lang bij een abstracte definitie voor energie stil te staan. Het interessante aan energie is dat het overall rondom ons aanwezig is en heel belangrijk is voor alle processen in de natuur. Daarom zullen we niet met een strikte definitie werken maar met een vereenvoudigde voorstelling van energie (d.i. een model voor energie) dat duidelijk beschrijft hoe energie onze wereld vormgeeft.

3.2 Een visueel model voor energie

Een visueel model voor energie maakt het mogelijk om energie voor mensen zonder wiskundige achtergrond behapbaar te maken (Scherr et al., 2012). Binnen deze cursus kiezen we ervoor om energie voor te stellen door vierkantjes⁸. Eén vierkantje is een energie-eenheid. Hoe meer vierkantjes samen, hoe meer energie een voorwerp heeft. Het voordeel van dit model is dat het energie zichtbaar maakt en dat we direct ook een beeld krijgen op de hoeveelheid energie er in een systeem aanwezig is, dus we blijven dicht bij de wiskundige betekenis.

Met dit model kunnen we gemakkelijk de kracht van het begrip duidelijk maken. We bespreken eerst vier voorbeeldsystemen die ook aanwezig waren in de beginopdracht van het hoofdstuk (zie Figuur 64). Al deze systemen hebben op een bepaald begintijdstip een hoeveelheid energie en dus ook een aantal vierkantjes.



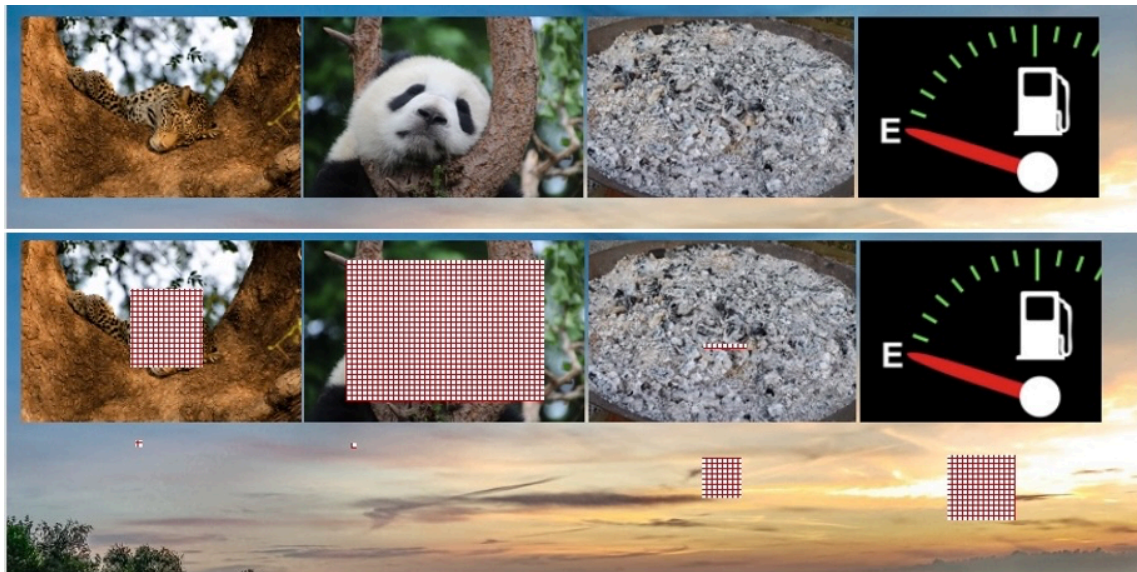
Figuur 64: Verschillende systemen (lopend luipaard, slapende volwassen panda, een hoeveelheid hout (25 kg) en een hoeveelheid benzine (25 kg)) met hun bijbehorende energie-inhoud op een begintijdstip.

Bemerk de verschillen tussen de energie-inhoud van de verschillende systemen. Een panda (van 100 kg) heeft meer energie dan een luipaard (30 kg), zelfs als dat luipaard tegen een heel hoge

⁸ Deze voorstelling verwijst naar het idee dat energie eigenlijk bestaat uit kleine pakketjes (deeltjes of golfpakketjes), maar wees er maar zeker van, energie heeft niks hoekig. Vierkantjes zijn gewoonweg gemakkelijker voor te stellen dan cirkeltjes.

snelheid loopt. Vloeibare brandstoffen hebben een grotere energie-inhoud dan eenzelfde massa brandhout.

De energie van een systeem is eigenlijk niet zo belangrijk. Wat er gebeurt met deze energie tijdens veranderingen of processen is veel interessanter. We kijken eerst naar het luipaard dat moet bekomen van zijn heel korte maar vermoeiend looptochtje. We zien dat hij zo goed als al zijn energie nog heeft behouden. Er is een heel kleine fractie van zijn energie (minder dan 1 vierkantje) naar de omgeving verdwenen. Hopelijk haalt hij de volgende keer wel een buit binnen zodat hij dit verlies kan aanvullen.



Figuur 65: Dezelfde systemen uit de vorige figuur maar nu op een eindtijdstip samen met hun bijhorende energie-inhoud (luipaard rust uit, panda blijft slapen, het hout is verbrand en de benzine is volledig opgebruikt in een auto).

De panda heeft een ganse nacht geslapen, en ook hier zien we een klein deeltje van zijn energie die naar de omgeving is verdwenen⁹. Een panda is een levend wezen en al zijn basale functies (hart, vertering, lichaam op een vaste temperatuur houden, ...) kosten energie. Morgen gaat hij de ganse dag moeten eten om dit verlies aan te vullen.

Het hout is verbrand. Zo goed als al de energie van het systeem is naar de omgeving verdwenen. Die omgeving is hierdoor licht opgewarmd, maar doordat de buitenomgeving zo groot is kunnen we dit verschil zelfs nog nauwelijks meten. Hadden we het hout binnenshuis verbrand dan hadden we wel een temperatuurverschil gezien, maar na verloop van tijd zou ook dat verschil zijn verdwenen. Dit geldt voor alle energie die wordt vrijgemaakt door verbranding (ook de panda en het luipaard verbranden energie). Uiteindelijk verdunt de energie in de omgeving. Ze is dus niet weg, alleen maar zo verspreid dat het moeilijk is om er nog iets mee te doen. De as heeft nog een beetje energie overgehouden. Het smeult nog wat na, maar uiteindelijk zal het merendeel van deze energie ook onbruikbaar worden en 'verdwijnen' in de omgeving.

Hetzelfde verhaal voor de benzine. Het is gebruikt om een auto te laten rijden. Hierdoor verdween er direct bijna twee derde van de energie naar de omgeving door de opwarming van de verbrandingsmotor. Maar de auto komt uiteindelijk weer stil te staan, de remmen en de lucht

⁹ Ook hier eigenlijk minder dan 1 vierkantje.

rondom de auto zijn hierdoor opgewarmd. Als de auto niet stiekem bergop is gereden dan zal al die waardevolle energie van de brandstof volledig in de omgeving zijn verdwenen.

Deze voorbeelden maken duidelijk waarom energie zo belangrijk is. *Leven en de processen die daaraan gekoppeld zijn vragen om een continue aanvoer van energie.* Zo goed als al die energie, komt als we ze niet tijdelijk opslaan in bepaalde reservoirs (maar daarover verder meer) uiteindelijk sterk verdund in de omgeving terecht. Gelukkig leven we op een plaats waar de aanvoer van energie zo goed als onuitputtelijk is. De zon voorziet ons van een onuitputtelijke energieaanvoer. Het is de zon die het leven op aarde mogelijk maakt (zie Figuur 66).



Figuur 66 De zon voorziet ons de komende 10 miljard jaar van een continue aanvoer van grote hoeveelheden energie. We kunnen die rechtstreeks oogsten via fotovoltaïsche zonnepanelen en windturbines. Daarnaast zorgt de zon ook voor de nodige energie voor fotosynthese waardoor we kunnen stellen dat de klassieke brandstoffen uiteindelijk van de zon afkomstig zijn.

Ons energiemodel houdt bij waar de energie op een bepaald moment is en helpt ons dus inschatten hoeveel energie zich verplaatst heeft tijdens verschillende processen. We vatten ons model nog eens samen in Figuur 67, maar nu op een meer abstractere manier. **Elk systeem bevat een hoeveelheid energie. Deze energie-inhoud kan berekend of gemeten worden¹⁰. Tijdens veranderingen/processen gaat de energie van het systeem niet verloren, maar het verplaatst zich.**

Ofwel komt er energie vanuit de omgeving het systeem binnen (Proces 1). Voorbeelden hiervan zijn opwarming door zonne-energie, het opnemen van voedsel ...

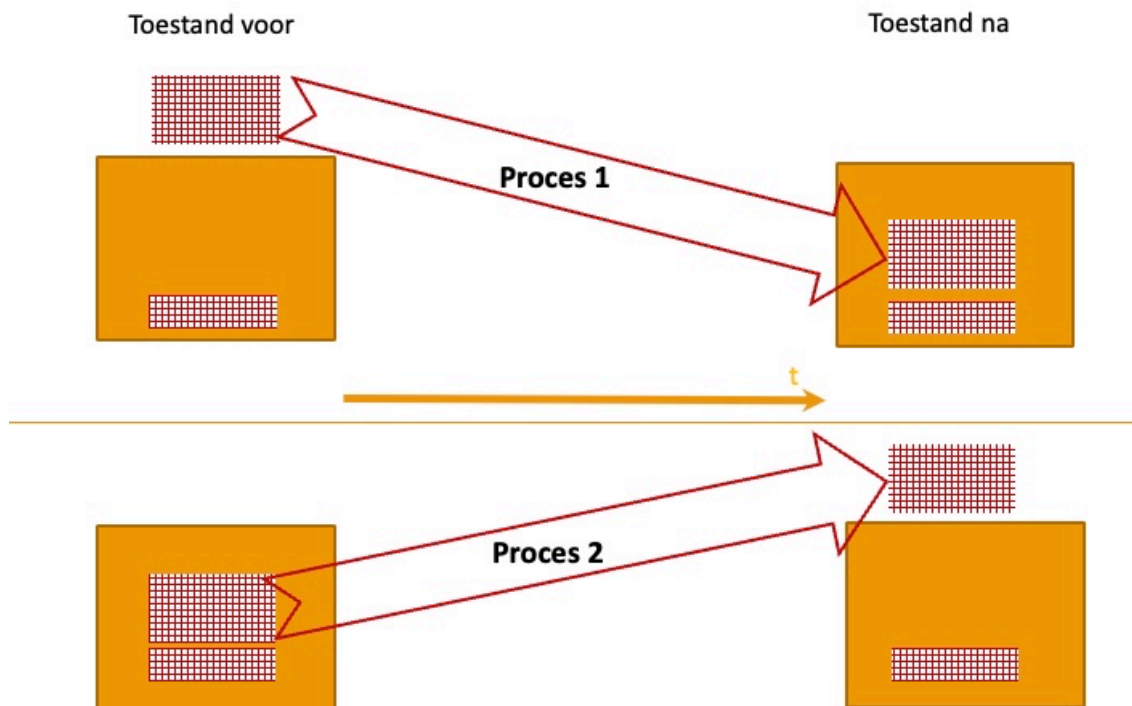
Ofwel verdwijnt er energie uit het systeem en komt dit in de omgeving terecht (Proces 2).

Voorbeelden hiervan zijn het afremmen van een auto, het opbranden van een kaars ... Energie helpt ons om de balans van het proces op te maken en in te schatten hoelang dit proces kan blijven doorgaan.

De energievoorstelling geeft geen details over hoe het proces juist verloopt. Je hoeft dus een proces niet gedetailleerd te begrijpen om er toch enkele zinvolle dingen over te kunnen zeggen.

¹⁰ Deze uitspraak is eigenlijk iets te straf geformuleerd. De energie-inhoud van een systeem kan niet rechtstreeks worden gemeten (zoals bijvoorbeeld de temperatuur van een stof rechtstreeks met een thermometer kan gemeten worden). Energiemeters meten enkel hoeveel energie zich verplaatst tijdens processen en daaruit kunnen we dan afleiden hoeveel energie er in het systeem zat. Het is dus een onrechtstreekse meting.

De energiebril is daarom zo een interessant hulpmiddel om naar het geheel te kijken zonder je te verliezen in details.



Figuur 67: Energiemodel voor twee types processen (proces 1 en 2 aangegeven door de rode pijl). We kijken steeds naar hoeveel energie er voor het proces aanwezig is en waar de energie is na het proces. De energie is weergegeven als een verzameling van kleine vierkantjes, het systeem dat we bestuderen is voorgesteld door de grote rechthoek. In proces 1 komt er energie het systeem binnen vanuit de omgeving (vb. de aanvoer van zonne-energie). In proces 2 verdwijnt er energie vanuit het systeem naar de omgeving (vb. verbranding).



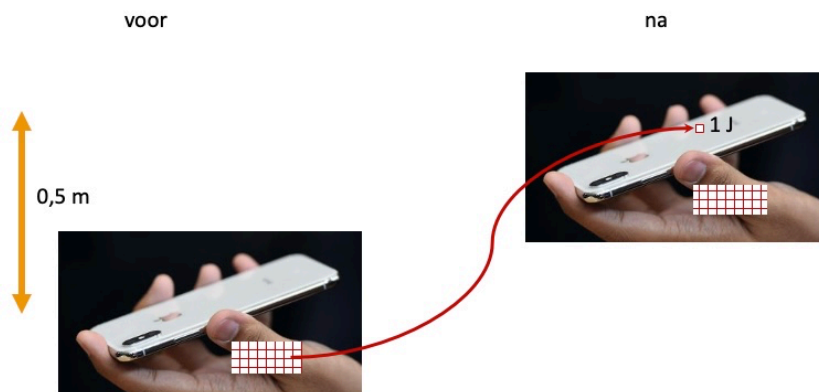
Oefening

Oefen je in het energiemodel. Zoek extra voorbeelden bij processen van het type 1 en 2. Zijn er ook processen te vinden waarbij het systeem geen energie verliest of extra energie uit de omgeving krijgt? Indien ja, vind enkele voorbeelden. Indien nee, waarom niet?

3.3 Hoe groot is 1 joule?

De eenheid van energie is de joule (J), genaamd naar de Engelse natuurkundige James Prescott Joule (1818-1889) die mee de grondslagen legde voor ons huidig energiebegrip. Hij bestudeerde stoommachines, de technologische doorbraak van dat moment die de wereld volledig veranderde en van Engeland een wereldmacht maakte (*James Prescott Joule - Wikipedia*, n.d.). Joule kwantificeerde hoeveel energie er in verschillende energiebronnen zat en legde daarbij het fundament voor een kwantitatieve aanpak van het energiebegrip.

Hoeveel energie 1 J is kan je heel gemakkelijk zelf ervaren. Neem een smartphone (heeft doorgaans een massa van 200 g) en verplaats die een halve meter naar boven. Tijdens deze beweging verplaats je 1 J energie van je hand naar je smartphone.



Figuur 68 Ervaar hoeveel 1 J energie is. Verplaats met je hand een smartphone 0,5 m naar boven. Er heeft zich daardoor 1 Joule energie van je hand naar de smartphone verplaatst¹¹.

Deze oefening maakt hopelijk duidelijk dat 1 Joule energie een vrij bescheiden hoeveelheid energie is. Als je je smartphone van deze hoogte laat vallen heeft hij vlak voordat hij de grond raakt een snelheid van 11 km/h. Het is duidelijk dat meest voorkomende energieprocessen rondom ons, denk maar aan met de auto rijden of een ruimte verwarmen, veel meer energie nodig hebben dan 1 J. Als we energie-inhouden bestuderen, gebruiken we daarom dikwijls afgeleide eenheden:

- de kilojoule (kJ) = 10^3 J,
- de megajoule (MJ) = 10^6 J,
- de gigajoule (GJ) = 10^9 J,
- de terrajoule (TJ) = 10^{12} J.

Om de verplaatsingen van elektrische energie bij te houden wordt heel dikwijls het kilowattuur gebruikt. Deze grootheid is gekoppeld aan het begrip vermogen en wordt verder nog beter uitgelegd (zie 3.7.2). Het is hier al van belang om te weten dat

- 1 kilowattuur (1 kWh) = 3,6 MJ.

Het is duidelijk dat het kilowattuur een eenheid is waarmee je al stevige dingen in beweging kan krijgen. Zo kan je met 1 kWh energie een grote vrachtwagen van 10 ton een snelheid van bijna 100 km/h geven. Een doorsnee elektrische auto heeft gemiddeld 0,16 kWh energie nodig om 1 km te rijden, dus met 1 kWh raak je toch al verder dan 6 km (*Hoeveel Stroom Verbruikt Een Elektrische Auto?* - Lumiworld, n.d.).

Ter volledigheid vermelden we hier ook nog de oude eenheid voor energie (die jammer genoeg nog redelijk veel in omloop is), d.i. de kilocalorie, waarbij 1 kcal = 4,18 kJ. De kilocalorie is een maat voor de hoeveelheid energie nodig om de temperatuur van 1 kg water met 1 °C te laten stijgen.

¹¹ In de startpositie heeft de smartphone uiteraard ook al energie (het bevat een batterij, het bevindt zich op een bepaalde hoogte). Maar voor de duidelijkheid van de tekening wordt die niet weergegeven.

3.4 Energievormen en energiereservoirs

3.4.1 Het lijstje geordend

We weten dat energie zich verplaatst tijdens verschillende processen. Afhankelijk van waar de energie zich bevindt, geven we het een verschillende naam. Men spreekt dan van energievormen, hoewel deze naam wat misleidend is¹². Het suggereert namelijk dat bijvoorbeeld mechanische energie een andere energie is dan thermische of chemische energie. Maar niets is minder waar, het gaat steeds over dezelfde energie (met dezelfde eenheid), ze zit gewoon op een andere plaats. De context waarin we naar de energie kijken is anders.

Vermits het begrip ‘energievormen’ nog steeds heel courant is blijven we deze terminologie behouden, alleen houden we in het achterhoofd dat er aan de energie zelf niets is veranderd.

Welke energievormen zijn er dan? Dat is ook een onderwerp van discussie. In verschillende handboeken worden soms verschillende classificaties gehanteerd en dikwijls krijgen dezelfde energievormen ook een verschillende naam. De nieuwe eindtermen (*Onderwijsdoelen*, n.d.) geven ondertussen wel wat structuur en wij houden ons hier aan de keuzes die daarin zijn gemaakt. Men krijgt dan het volgende lijstje:

- kinetische energie,
- gravitationele energie,
- elastische energie,
- chemische energie,
- thermische energie,
- stralingsenergie,
- kernenergie,
- elektrische energie.

Doorgaans gaan lessen energie in de eerste graad over het aanleren en inoefenen van deze lijst aan de hand van voorbeelden. Wij proberen in dit hoofdstuk om voorbij een vage opsomming te gaan en meer inzicht te brengen in de fysische relevantie van de verschillende energievormen. Onze lijst heeft dan ook meer structuur en staat weergegeven in Tabel 1.

1. Energiereservoirs		
	<i>Potentiële energie</i>	<i>Kinetische energie</i>
<i>Micro</i>	• chemische energie • kernenergie • elektrische energie	• thermische energie
<i>Macro</i>	• gravitationele energie • elastische energie	• kinetische energie of bewegingsenergie van voorwerpen
2. Energie die zich verplaatst:		
	• stralingsenergie	

¹² In Engeland heeft men deze terminologie ondertussen volledig verlaten (Millar, 2014; The National Strategies, 2003) en spreekt men enkel nog over energieverplaatsingen.

- elektrische arbeid
- mechanische arbeid
- warmte

Tabel 1: De energievormen gestructureerd volgens hun functie. De begrippen arbeid en warmte komen later maar aan bod.

Bemerk dat we de energievormen op verschillende manieren ordenen.

Allereerst is er de fundamentele opsplitsing tussen **energieservoirs en energie die zich verplaatst**. Het merendeel van de energievormen die moeten besproken worden zijn energieservoirs. Dit wil zeggen dat men die kan gebruiken om energie op te slaan voor later gebruik. De enige uitzondering is stralingsenergie. Deze energie is zich aan het verplaatsen en is daardoor vergelijkbaar met warmte en arbeid die pas later in dit hoofdstuk aan bod komen. Stralingsenergie is dus energie in beweging. Het verplaatst zich van het ene reservoir (vb. van de zon die kernenergie bevat en die via kernfusie omzet) naar het andere reservoir (vb. de aarde waarin de planten de invallende stralingsenergie opnemen en omzetten in chemische energie).

De energieservoirs worden nogmaals in twee dimensies geordend.

- In de eerste dimensie maakt men een onderscheid tussen het **microniveau en op macroniveau**. Het macroniveau is het niveau van het dagelijks leven, het microniveau is het niveau van de deeltjes. De energieservoirs van dit niveau kan je enkel zichtbaar maken als je heel sterk inzoomt in de materie.
- Daarnaast is er de dimensie van **potentiële en kinetische energie**. De kinetische energie is energie die in de beweging zit opgeslagen, men spreekt soms ook van bewegingsenergie. Potentiële energie is energie die voorwerpen of deeltjes bezitten dankzij de aanwezige krachtvelden.

We hebben nu genoeg achtergrond om verschillende energieservoirs wat grondiger te bekijken.

3.4.2 Mechanische energie

We beginnen met de macroscopische energieservoirs, dus de energie van macroscopische voorwerpen. De drie belangrijkste reservoirs (kinetische of bewegingsenergie, gravitationele energie en elastische energie) worden dikwijls samengebundeld tot de verzamelnaam **mechanische energie** omdat deze energievormen vooral binnen het vak mechanica worden bestudeerd.

Bewegingsenergie of kinetische energie

Een voorwerp dat beweegt bezit energie. Voorwerpen moet je wel ruim zien. Dat kan een rollende bal zijn maar even goed water dat stroomt of een massa lucht die beweegt, wind dus.

De bewegingsenergie kan de omgeving gemakkelijk veranderen (vb. via botsingen kan de bewegingsenergie worden doorgegeven of kunnen andere voorwerpen van vorm veranderen).

Bewegingsenergie verdwijnt dikwijls door wrijving van het bewegende voorwerp met de omgeving. Hierdoor neemt de temperatuur van de omgeving toe.

We geven hier nog enkele kwantitatieve voorbeelden:

- smartphone met een snelheid van 11 km/h = 1 J,
- auto (1200 kg) aan een snelheid van 50 km/h = 116 kJ,
- auto (1200 kg) aan een snelheid van 100 km/h = 463 kJ.



Achtergrond

In Fysica 1: Mechanica wordt een formule afgeleid voor de grootte van de kinetische energie. Deze hangt af van de **massa** van het voorwerp en de **snelheid** waarmee het voorwerp beweegt. Je moet maar denken aan de energie die vrijkomt na een botsing. Hoe zwaarder een boek is, hoe meer pijn het doet als je het laat vallen en als het op je tenen terecht komt. Dus, hoe groter de massa, hoe groter de kinetische energie. Tussen de kinetische energie en de massa bestaat een recht evenredig verband. Als de massa verdubbelt dan verdubbelt de kinetische energie.

Hoe groter de snelheid, hoe groter de kinetische energie. Maar tussen deze twee grootheden is er geen recht evenredig verband. De kinetische energie is recht evenredig met het **kwadraat van de snelheid**. M.a.w., als de snelheid drie keer groter wordt, dan wordt de kinetische energie negen keer groter.

De formule is $E_{kin} = \frac{1}{2} m v^2$.

Let wel op! Het gaat hier over een vooruit of achteruit beweging of over het maken van een bocht. M.a.w. het centrum van het lichaam moet zich verplaatsen. We spreken hier niet over de energie van een voorwerp dat rond zijn eigen as draait, dat is een andere formule (Giancoli, 2017).



Het was de Franse Emilie du Châtelet (1706-1749) die via valexperimenten in zand aantoonde dat de kinetische energie evenredig moest zijn met het kwadraat van de snelheid (Zinsser & Hayes, 2006). Hierdoor loste ze een lopende discussie op tussen Newton en Leibniz. Newton dacht dat de energie evenredig was met de snelheid, Leibniz zat op het juiste spoor (zie ook de bijhorende onderzoeksoopdracht), Newton verwarde met het begrip impuls dat wel recht evenredig is met de snelheid.

Gravitationele energie

Dit is de potentiële energie die een voorwerp verkrijgt door de inwerkende zwaartekracht. In tegenstelling tot de kinetische energie is deze energie niet rechtstreeks zichtbaar. We kunnen maar weten dat deze energie aanwezig is door de krachten hun gang te laten gaan (de voorwerpen niet meer tegen te houden) en de potentiële energie te laten omzetten in kinetische energie. Hoe meer kinetische energie, hoe meer gravitationele energie er aanwezig was. Het is dan ook duidelijk dat hoe hoger de voorwerpen zich van het aardoppervlak bevinden hoe meer potentiële energie ze bezitten.

We geven hier nog enkele kwantitatieve voorbeelden:

- smartphone (200 g) op een hoogte van 0,5 m = 1 J,
- auto (1200 kg) op een hoogte van 10 m = 118 kJ,
- persoon (80 kg) op de Mount Everest (8849 m) = 6,9 MJ.



Achtergrond

In Fysica 1: Mechanica wordt een formule afgeleid voor de grootte van de gravitationele energie dicht bij het aardoppervlak. Deze gravitationele energie hangt af van de **massa** van het voorwerp en de **hoogte** van het voorwerp ten opzichte van het aardoppervlak. Beide grootheden zijn recht evenredig met de gravitationele energie. De constante die deze grootheden met elkaar verbindt is de zwaarteveldsterkte g .

De formule is $E_{pot} = m \cdot g \cdot h$.

Let wel op! Zelfs al sta je op de begane grond, dan heb je nog altijd gravitationele energie want als er ineens een put in de grond is, zal je ook vallen. Hier botsen we op een belangrijke eigenschap van potentiële energie. De juiste waarde van de energie wordt bepaald door de keuze van een referentiepunt waarbij men de energiewaarde gelijkstelt aan nul. Zolang je het referentiepunt niet verandert blijven de formules wel kloppen. Zo ga je in een put een negatieve energie hebben, waardoor je inderdaad minder energie hebt door in de put af te dalen.

Elastische energie

Ook dit is een vorm van potentiële energie die samengaat met de krachten die ontstaan als je voorwerpen samendrukt of uitrekt. Een knikker in een opgespannen katapult krijgt bij het loslaten van de katapult meer (kinetische) energie doordat de elastische kracht van het elastiek ertegen duwt. De elastische energie hangt af van de grootte van de vervorming (meer of minder uitrekken) en het soort materiaal (dikke of dunne elastiek, soort rubber). We geven hier nog enkele kwantitatieve voorbeelden:

- elastiekje 15 cm uitgerekt = 1 J,
- trampoline waarop een persoon van 50 kg 1 meter hoog springt = 0,5 kJ.



Achtergrond

In Fysica 1: Mechanica wordt een formule afgeleid voor de grootte van de elastische energie voor een veer met veerconstante k . De formule is voor deze potentiële energie is $E_{pot} = \frac{1}{2} k x^2$.

3.4.3 Energievormen op microniveau

We zoomen nu in de materie in en kijken welke energievormen een rol spelen op het deeltjesniveau (microniveau).

Chemische energie

Alle materie bestaat uit deeltjes die elkaar aantrekken. De bindingskrachten tussen de deeltjes geeft aan deze deeltjes een potentiële energie die we de chemische energie noemen. Bij het vormen van nieuwe stoffen in chemische reacties worden de atomen herschikt en wijzigen de interacties (let wel op, de atomen zelf veranderen niet). Hierbij kan er energie vrijkomen (vb. bij verbrandingsreacties) of is er net energie nodig om de reactie te laten doorgaan (vb. het splitsen van water in waterstof en zuurstof).

Heel gekend is de chemische energie van voeding. Vermits we de energie in deze voedingstoffen halen door ze te ‘verbranden’ (d.i. verbinden met zuurstof) kan je voor elke voedingstof gemakkelijk terugvinden hoeveel energie je maximaal uit deze stoffen kan halen. Men meet die hoeveelheid energie dan ook letterlijk door deze voedingstoffen te verbranden. Enkele voorbeelden tonen aan dat materie veel chemische energie bevat, zeker als je deze waarden vergelijkt met de macroscopische energiereservoirs:

- 100 g chocolade bevat 2 MJ
- 100 g brood bevat 1 MJ
- 1 kg hout 15 MJ
- 1 kg mazout 40,6 MJ
- 1 m³ waterstof 120 MJ

Kernenergie

Alle materie bevat ook kernenergie, dit is eigenlijk de ‘chemische energie’ van de atoomkernen’. Bij gewone chemische reacties veranderen de atomen niet dus is het niet van belang om deze energie te bekijken, want ze verandert toch niet. Bij kernreacties (vb. het samensmelten van verschillende kernen (kernfusie), of het splitsen van kernen zoals dat gebeurt in kerncentrales) veranderen de atomen wel fundamenteel en komen er na de reactie nieuwe atomen tevoorschijn. Vermits de kernkrachten veel sterker zijn dan de elektromagnetische krachten tussen de atomen komt er bij deze reacties enorm veel energie vrij. Daarom dat men zo geïnteresseerd is in deze processen voor de productie van energie. Zo kan men uit 1 kg Uranium (²³⁵U) 23 miljoen kWh elektriciteit halen (d.i. 82 TJ, of $82 \cdot 10^{12}$ J energie).

Elektrische energie¹³

Het is niet gemakkelijk om elektrische energie op te slaan in een reservoir. Heden ten dage zijn we omgeven door elektriciteit, maar dit is elektrische energie die zich aan het verplaatsen is (dit zullen we later elektrische arbeid noemen). Als de centrale stopt met de aanvoer van deze energie dan verdwijnt ze zo goed als ogenblikkelijk. Je kan elektrische energie enkel opslaan in wat men condensatoren noemt, twee metalen plaatjes die dicht bij elkaar staan waarbij op de ene plaat een negatieve lading zit en op de andere een positieve. Vermist beiden elkaar aantrekken blijft de energie stabiel op de platen zolang je deze platen niet verbindt met elkaar.

Condensatoren zitten in elektronische toestellen en worden gebruikt om bijvoorbeeld plotse elektriciteitspannes te bufferen. Jammer dat er niet zo veel energie in zo een condensator past. Je hebt al een heel stevige condensator nodig om 1 J energie op te slaan. Tijdens een onweer zijn de wolken en de aarde ook twee condensatorplaten. Doordat het oppervlak van deze condensator hier heel erg groot is, kan zich hierdoor wel veel energie verzamelen. Niet voor niks zijn bliksemflitsen (het ontladen van deze condensatoren) zo gevaarlijk.



Didactische tips

¹³ Het begrip elektrische energie wordt zelfs in gespecialiseerde handboeken ook gebruikt voor elektrische arbeid (elektrische energie in beweging). Wij gaan in dit hoofdstuk ook niet te puriteins doen en beide begrippen door elkaar gebruiken. In de eerste graad heeft het geen zin om beide begrippen scherp te gaan onderscheiden. In de tweede graad kan je dit wel in de wetenschappelijke richtingen.

Het begrip elektrische energie wordt zelfs in gespecialiseerde handboeken ook gebruikt voor elektrische arbeid (elektrische energie in beweging). Wij gaan in dit hoofdstuk ook niet te puriteins doen en beide begrippen door elkaar gebruiken. In de eerste graad heeft het geen zin om beide begrippen scherp te gaan onderscheiden. In de tweede graad kan je dit wel in de wetenschappelijke richtingen.

Thermische energie:

Thermische energie is energie ten gevolge van de beweging van de deeltjes en dus een vorm van kinetische energie. Thermische energie is gekoppeld aan de temperatuur van voorwerpen, maar het is niet hetzelfde. De temperatuur zegt hoe snel de individuele deeltjes bewegen, en de thermische energie is de som van al deze kinetische energieën. Je kan dus een hoge temperatuur hebben, maar toch niet veel energie (vb. een gloeiend hete nagel in een kom koud water zal de temperatuur van het water weinig veranderen).

Thermische energie gaat wel weer over grote hoeveelheden energie. Enkele voorbeelden

- 1 kg water (van 25 °C) laten koken vraagt 312 kJ (0,088 kWh)
- 1 kg water laten verdampen vraagt 2256 kJ (0,627 kWh)



Didactische tips

In sommige handboeken (Zoals Biogenie 1) spreekt men van warmte-energie. Ook in Nederland maakt men gebruik van deze benaming. Probleem is dat warmte (net als straling) transport is van energie van één plaats naar een andere. Warmte is dus niet hetzelfde als warmte-energie en dit kan dan in de tweede graad tot verwarring leiden. Uiteraard als Biogenie wordt gebruikt in een school moet je aansluiten bij deze terminologie. Zorg er dan gewoon voor dat warmte en warmte-energie niet door elkaar worden gebruikt.

3.4.4 Energie die zich verplaatst

Stralingsenergie

Zoals reeds werd vermeld is straling(senergie) niet echt een energiereservoir maar energie die zich aan het verplaatsen is¹⁴. Straling bezit je niet, maar het is een manier om energie over te brengen. Het is energie die onderweg is, net zoals warmte en arbeid dat zijn. Straling kan het volledige elektromagnetisch spectrum beslaan, met dus onder andere radiogolven, microgolven, infrarood, zichtbaar licht, ultraviolet, X-stralen en gammastralen. Dikwijls zal de stralingsenergie die wij bestuderen gewoon zichtbaar licht zijn.

Warmte en arbeid:

Deze staan doorgaans niet in de lijstjes van de handboeken eerste graad, omdat de auteurs zich hier wel bewust zijn van het feit dat warmte en arbeid geen echt energiereservoirs zijn. Ze spelen wel een belangrijke rol in veranderingsprocessen en verder aan bod.

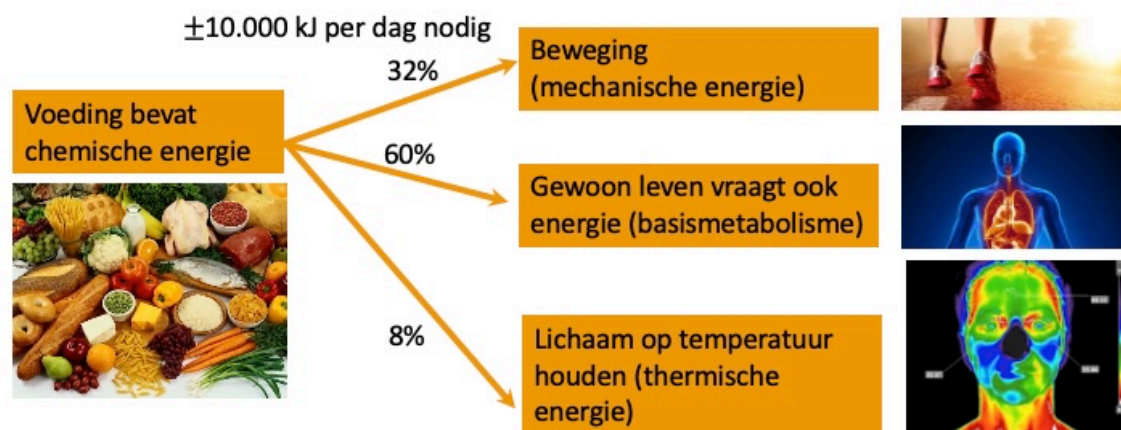
3.4.5 Ons lichaam als lichtend voorbeeld van energievormen

Afhankelijk van waar de energie zich bevindt en de functie die ze vervult, krijgt de energie meestal een andere naam. We illustreren dit aan de hand van een energiestroom die je dag in dag uit zelf

¹⁴ In de strikte zin is het geen energie en spreek je beter over straling. Maar in veel handboeken gebruikt men het woord stralingsenergie (zeker nu de terminologie in de eindtermen staat).

ervaart, namelijk die in je eigen lichaam. Dagelijks heeft een volwassen lichaam ongeveer 10 MJ energie nodig die het opneemt via voeding. Dit is chemische energie die via het spijsverteringsstelsel wordt verbrand en gebruikt om

- te bewegen (32 % van die chemische energie wordt zo mechanische energie om ons lichaam in zijn geheel te verplaatsen),
- ons lichaam draaiend te houden (60 % wordt mechanische energie voor de ademhaling, bloed rondpompen, voeding doorheen de lichaam leiden ... en elektrische energie¹⁵ voor de hersenactiviteit),
- ons lichaam op 37°C te houden (8% van die chemische energie wordt zo thermische energie).



Figuur 69 Energiestroom doorheen ons lichaam.

We benadrukken hier graag nog eens dat het steeds over dezelfde energie gaat (uitgedrukt in Joules), alleen zit die geordend in een ander reservoir waardoor ze een andere naam krijgt. Bij elk soort reservoir horen ook processen die eigen zijn aan dit reservoir. Zo zal de thermische energie zich op een heel karakteristieke manier verspreiden (van hoge temperatuur naar lage temperatuur), iets wat grondiger in het hoofdstuk warmtetransport wordt bestudeerd. Het is belangrijk om te beseffen dat leerlingen dus wat achtergrond nodig hebben om de energieverplaatsingen of omzettingen goed te kunnen begrijpen. Maak dus voorbeelden van de energie-omzettingen/verplaatsingen die je bestudeert dus niet te moeilijk. Zorg dat leerlingen de processen kennen uit het dagelijks leven.

3.5 Energievormen en energiedichtheid

Bij de verschillende energievormen werd het al snel duidelijk dat voor de verschillende energievormen de energie niet even dicht bij elkaar zit. Dit wordt het best duidelijk als we de energie-eenheid vergelijken in verschillende reservoirs.

Eén joule energie is:

- de mechanische energie nodig om:
 - een smartphone 0,5 m omhoog te brengen,
 - een elastiek 15 cm uit te rekken of
 - een massa van 1 kg een snelheid van 5 km/h te geven;
- de thermische energie nodig om

¹⁵ Correcter is het om hier te spreken van elektrische arbeid, maar zeker in de eerste graad is dit alleen maar verwarrend.

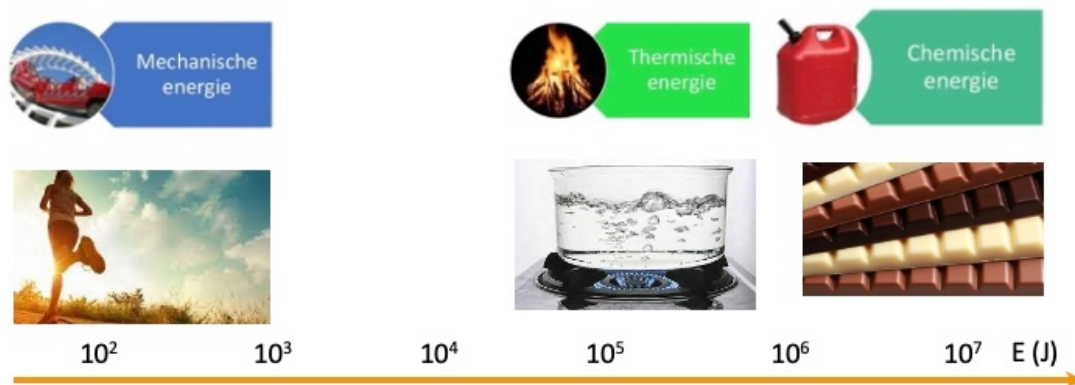
- 1 dm³ lucht (1 g) 1 °C op te warmen, of
- 1 cm³ water (1 g) 0.24 °C op te warmen;
- de chemische energie van een schilfertje chocolade (1/2 000 000 van een reep van 100 g);
- de kernenergie in 0,012 10⁻¹² kg Uranium.

Het wordt hierdoor al snel duidelijk dat de energie ruimtelijk veel minder dicht bij elkaar zit in mechanische energie dan in bijvoorbeeld chemische energie, laat staan kernenergie. Het is niet voor niets dat het merendeel van de energie die we omzetten uit chemische en kernenergie komt (ook zonne- en windenergie komen uit het kernenergie reservoir). Binnen deze context gebruikt men ook het begrip energiedichtheid (hoeveel energie er zit per kg van het energiereservoir). Welk vorm de grootste energiedichtheid heeft zal nu wel duidelijk zijn. Dit begrip helpt ons om verschillende brandstoffen met elkaar te vergelijken (zie Tabel 2).

Brandstof	Energiedichtheid (MJ/kg)
Hout	10
Ethanol	26,8
Kolen	32,5
Ruwe olie	41,9
Diesel	45,8
Uranium (bruikbaar voor kerncentrale)	3 900 000

Tabel 2: Overzicht van energiedichtheid van verschillende energiedragers.

Hetzelfde idee vind je terug in Figuur 70 dat karakteristieke hoeveelheden energie weergeeft die vrijkomen als men deze energiereservoirs aanboort. Bemerkt dat kernenergie niet meer op deze figuur past.



Figuur 70 Energiereservoirs en de bijbehorende hoeveelheden energie die worden verplaatst/omgezet. Kernenergie (10¹⁴ J) past niet meer op deze figuur.

Het concept energiedichtheid zit niet in de standaard eindtermen voor het secundair onderwijs. Toch is dit een concept dat veel inzicht geeft. Het verklaart onze worsteling met energie. Onze levens zijn gebaseerd op een heel vlotte aanvoer van mechanische en thermische energie. Mechanische energie voor transport en thermische energie voor verwarming. Op dit moment halen we het merendeel van deze energie uit chemische energie (fossiele brandstoffen) en kernenergie (via kerncentrales). Om van fossiele brandstoffen af te raken en onze CO₂ uitstoot te

verminderen zijn we aan het overschakelen naar zonne-energie en windenergie. Beiden komen uit het reservoir van de kernenergie en zijn zo goed als onuitputtelijk. Alleen is het niet gemakkelijk om deze energie te oogsten en op te slaan voor periodes met weinig wind en zon.



Oefening

Probeer uit te vinden hoeveel energie je gezin of jezelf op kot per jaar gebruikt. Maak onderscheid tussen elektriciteit, verwarming en transport. Analyseer deze data en vergelijk de absolute en relatieve waarden met andere studenten. Probeer grote verschillen te verklaren.

3.6 Energieomzettingen of energiestromen

In de Vlaamse handboeken legt men veel nadruk op energieomzettingen. Men traint leerlingen dan om de juiste omzettingen te zetten bij verschillende processen. Op zich is daar niets verkeerd aan, maar het is wel belangrijk om te beseffen dat leerlingen die processen nog niet grondig hebben gezien. De energieomzetting legt niet uit wat er juist gebeurt, het is een abstracte beschrijving die leerlingen dikwijls gewoon van buiten leren. Beperk je dus tot de concrete processen die veel voorkomen in het dagelijks leven en die je het liefst concreet demonstreert.

Tijdens energieomzettingen kijken we naar actieve processen en dus niet naar ‘de energie voor’ en ‘de energie na’. We bestuderen dus de pijlen van Figuur 65. De energie verplaatst zich tijdens deze processen van één reservoir naar een ander. Men spreekt dan van een energiestroom.

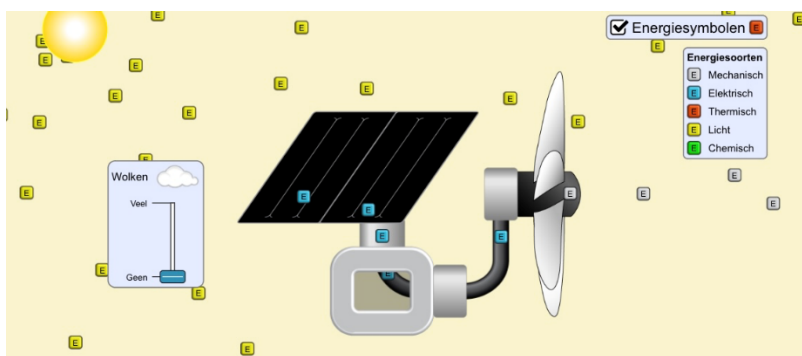
In onze aanpak zullen we dikwijls het woord energieomzetting vervangen door energiestroom waarbij we de nadruk leggen op de energieverplaatsing. We maken hierbij gebruik van ons visueel energiemodel dat is uitgewerkt in een PhET animatie dat online gratis ter beschikking is (Soorten En Veranderingen van Energie - Behoud van Energie | Energiesystemen | Energieoverdracht - PhET Interactieve Simulaties, n.d.). In deze PhET animatie wordt de energie ook gevisualiseerd door kleine vierkantjes. Ze geven deze een kleur afhankelijk van de energievorm.



Oefening

Vergelijk de energievormen zoals die gebruikt worden in de PhET animatie ‘Soorten en veranderingen van Energie’ (Soorten En Veranderingen van Energie - Behoud van Energie | Energiesystemen | Energieoverdracht - PhET Interactieve Simulaties, n.d.) en de energievormen zoals we die hebben gedefinieerd in 3.4 Energievormen en energiereservoirs. Controleer niet alleen de naam maar ook de betekenis van de energievormen.

3.6.1 Energiestroom doorheen een zonnepaneel



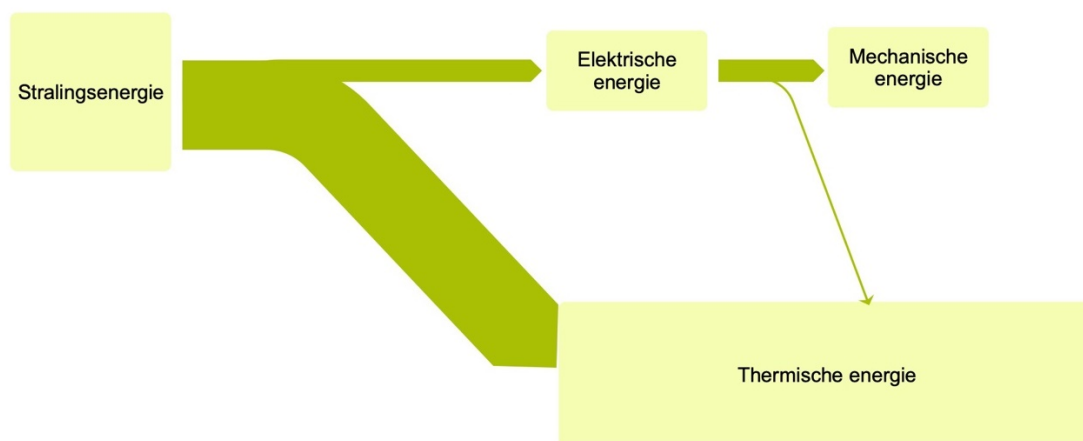
Beschrijf eerst hoe de energie juist stroomt. De energie komt van de zon en verplaatst zich via het zonnepaneel naar de bewegende lucht. Het zonnepaneel genereert hiervoor een elektrische stroom die de ventilator doet bewegen.

Als men via energievormen werkt kan je dit proces samenvatten als volgt:

Stralingsenergie (licht) $\Rightarrow$ elektrische energie¹⁶ $\Rightarrow$ mechanische energie + thermische energie.

Zo goed als elke energie-omzetting/verplaatsing gaat gepaard met de productie van thermische energie. Dit is een onvermijdelijke verliespost voor energie. Dus thermische energie is altijd één van de finale producten. Ook is het interessant om te beseffen dat het licht initieel van de zon komt (dus eigenlijk kernenergie is) en als er wolken voor de zon komen uiteindelijk al die mechanische energie ook gaat omgezet worden in thermische energie (de geproduceerde wind gaat verdwijnen).

Het is in deze context ook interessant om de energiestroom te visualiseren in een Sankey-diagram die grafisch weergeeft welk percentages van de energie naar welke reservoirs stromen. Hierdoor krijgen leerlingen veel beter voeling met de grote invloed van het thermisch energiereservoir in processen. De energiestroom doorheen een zonnepaneel wordt weergegeven in Figuur 71. Bemerkt dat het in deze figuur ook direct duidelijk wordt dat niet maar een beperkt deel van de stralingsenergie van de zon wordt omgezet in elektrische energie (grootte-orde 20%). De rest verdwijnt ook in het thermische reservoir.

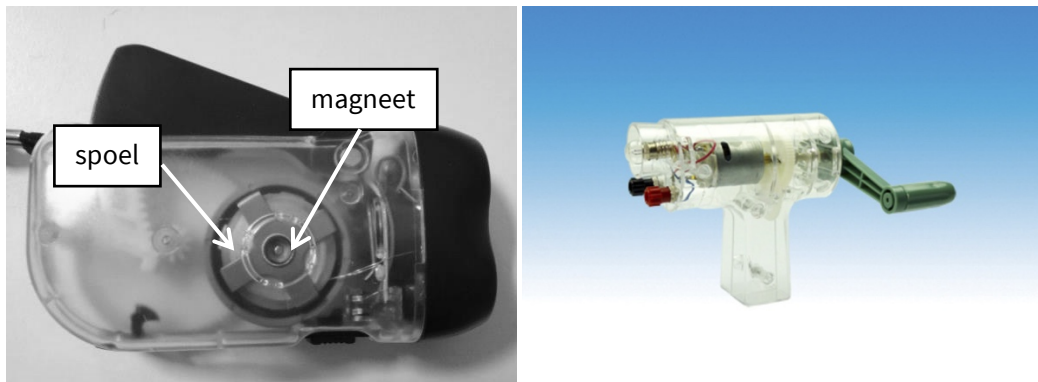


Figuur 71: Sankey-diagram van de energiestroom doorheen een zonnepaneel (Sankey Flow Show - Attractive Flow Diagrams Made in Minutes!, n.d.).

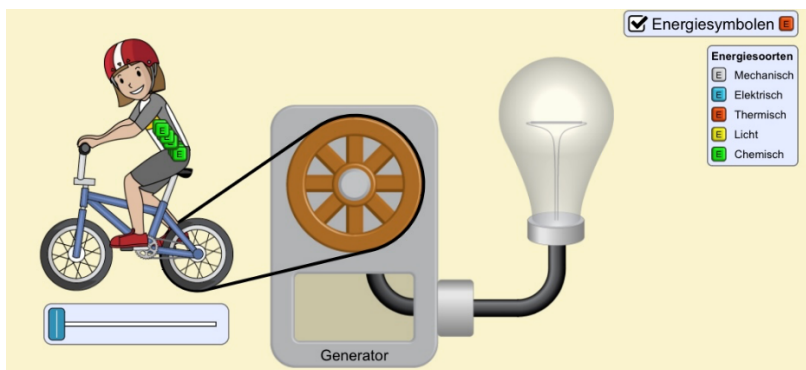
3.6.2 Energiestroom doorheen een generator

Een generator is een toestel die beweging omzet in elektrische stroom. Leerlingen kennen dit principe wel van handgeneratoren (Figuur 72). Elke keer als een magneet beweegt t.o.v. een spoel, ontstaat er een elektrische spanning in deze spoel. Een spoel is een geleidende draad die rond een cilindertje is gedraaid. Het stukje fysica dat hierachter zit, is 'het elektromagnetisme'. Dit valt buiten het bestek van deze cursus. Dit proces is enorm belangrijk. Niet alleen windmolens maken zo elektrische energie, ook kerncentrales maken via een generator elektriciteit.

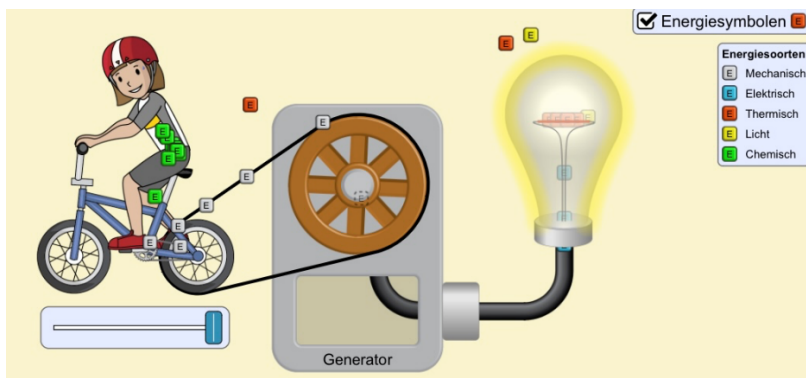
¹⁶ De elektrische energie is hier in beweging. Later gaan we dit elektrische arbeid noemen, maar voor een eerste graad kan men dit onderscheid niet echt maken.



Figuur 72: Handgeneratoren. Deze bevatten steeds een magneet en spoel (een opgerold stukje elektriciteitsdraad°. Als beiden ten opzichte van elkaar bewegen ontstaat er een elektrische stroom.



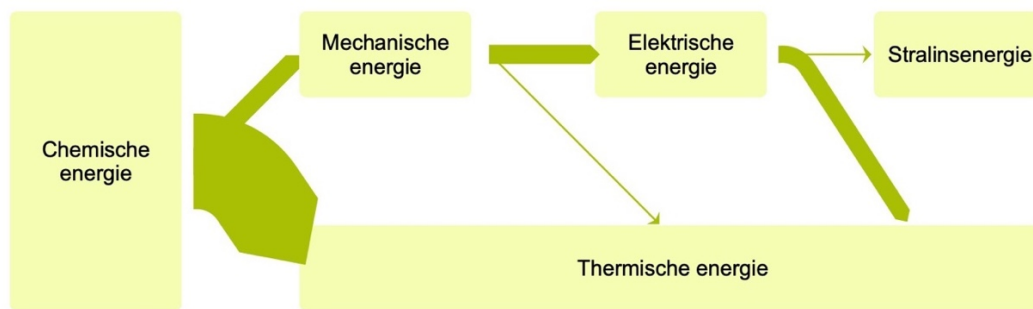
Bemerk dat de fietser initieel veel chemische energie heeft die ze tot zich heeft genomen via voeding. Deze energie gebruikt ze om te fietsen en zo de generator te doen draaien. Deze doet uiteindelijk een gloeilamp branden die naast licht geven ook opwarmt.



We krijgen nu volgende energiestroom:

chemische energie $\Rightarrow$ mechanische energie + thermische energie $\Rightarrow$ elektrische energie $\Rightarrow$ stralingsenergie (licht) + thermische energie.

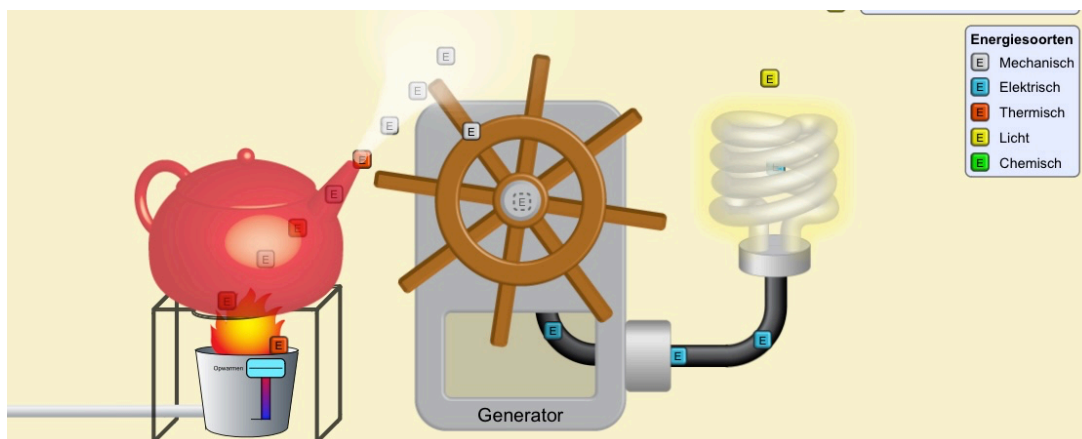
In een Sankey-diagram ziet deze energiestroom eruit als volgt.



Figuur 73: Sankey-diagram van de energiestroom die de fietser genereert via een generator (Sankey Flow Show - Attractive Flow Diagrams Made in Minutes!, n.d.).

Bemerk dat er bij elke omzetting steeds energie verdwijnt in het thermisch reservoir. Bij de gloeilamp gaat bijna 90 % van de energie verloren¹⁷, het is daarom dat we heden ten dage nog enkel met LED verlichting werken. Bemerk ook dat de fietser een significant deel van zijn chemische energie aan het thermisch reservoir verliest doordat hij meer bloed nodig heeft tijdens inspanningen en begint te zweten.

3.6.3 Productie van elektriciteit via stoom



Zowel in gas- als kerncentrales wordt elektriciteit via stoom opgewekt. De chemische energie van het gas of de kernenergie wordt omgezet in thermische energie en die wordt omgezet in bewegende stoom. Deze drijft de generator aan. Deze omzetting is wel niet zo efficiënt. Uit 1 joule thermische energie kan maar maximaal 0,33 joule elektriciteit worden gehaald (Giancoli, 2017).

De energiestroom ziet er uit als volgt:

thermische energie $\Rightarrow$ mechanische energie $\Rightarrow$ elektrische energie $\Rightarrow$ licht + nog een klein beetje thermische energie (spaarlamp).



Oefening

¹⁷ In de winter is deze energie niet echt verloren en helpt ze mee met de opwarming van je huis.

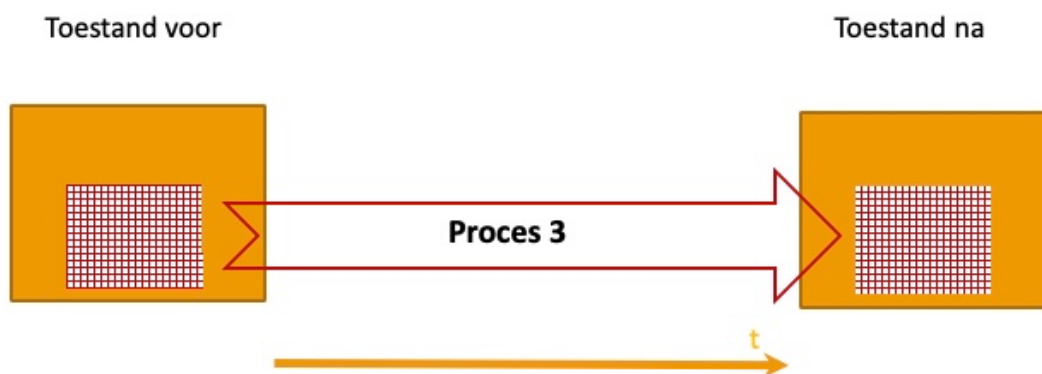


Maak voor deze omzetting en enkele zelf gekozen processen een Sankey diagram. Je kan gratis 10 figuren maken met een studentlicentie op (*Sankey Flow Show - Attractive Flow Diagrams Made in Minutes!*, n.d.)

3.6.4 Een vallend voorwerp

Een voorwerp dat een bepaalde hoogte heeft, heeft automatisch gravitationele potentiële energie. Als dit voorwerp losgelaten wordt (en dus geen ondersteuning of ophanging meer heeft) dan valt het. De aarde oefent dan een kracht uit op het voorwerp waardoor het versnelt. Naarmate de hoogte vermindert en dus de potentiële energie van dat voorwerp vermindert, vergroot de snelheid en krijgt het voorwerp dus steeds meer kinetische energie.

Op zich lijkt dit een klassieke energieomzetting, de energie stroomt van het reservoir van de potentiële energie naar kinetische energie. Maar toch is hier iets vreemd aan de hand. Als we het voorwerp als systeem nemen dan veronderstellen we in de mechanica meestal dat het systeem voor het proces (het vallen) evenveel energie heeft dan na het proces (vlak voor het voorwerp de grond raakt). Er verdwijnt dus geen energie naar de omgeving. We hebben dus naast proces 1 (energie van omgeving naar systeem), proces 2 (energie van het systeem naar de omgeving) ook nog een proces 3 waarbij de energie binnen het systeem wordt gerecycleerd (zie Figuur 74). Ondanks het feit dat dit proces in de echte wereld niet bestaat (het is eigenlijk een proces 2 waarbij we de hoeveelheid energie naar de omgeving verwaarlozen), speelt het een grote rol in de mechanica en zelfs in de thermodynamica (Giancoli, 2017). Men spreekt daar van ideale processen waarbij men wrijvingseffecten voor de eenvoud verwaarloost.



Figuur 74 Grafische voorstelling van proces 3 een ideaal proces waarbij er geen energie uit het systeem verdwijnt of geen wordt toegevoegd. Deze 'ideale' processen worden vooral bestudeerd in de mechanica en in de thermodynamica. In de praktijk bestaan deze processen niet, we verwaarlozen dus de kleine energiestroom die naar de omgeving gaat.



Didactische tips

In dit hoofdstuk zijn we een pak grondiger op energie ingegaan dan doorgaans gebeurt in de eerste graad. We zetten hier de belangrijkste inzichten nog eens op een rijtje en hoe je deze kan vertalen in je lessen.

- We weten niet wat energie juist is, dus verlies je niet in te abstracte definities. Gebruik wel grafische modellen die visueel maken hoe de energie stroomt tijdens processen. Werk zo veel mogelijk kwantitatief, met echte waarden.
- Zorg ervoor dat de bestaande leerlingendenkbeelden worden aangepakt. Daag leerlingen uit om hun eigen preconcepten te formuleren.
- Omschrijf bij energieprocessen telkens goed welk systeem je bekijkt. Energie is dus een eigenschap van het systeem. Het is fundamenteel verschillend met een kracht die geen eigenschap is van het systeem maar door het systeem wordt uitgeoefend op een ander systeem.
Je kan dit samenvatten in de boutade 'Energie heb je, een kracht oefen je uit'.
- Maak een duidelijk onderscheid tussen de toestand van het systeem (voor of na het proces) en het proces zelf.
- Besef dat leerlingen met verschillende handboeken werken en dat je dus verplicht bent om je aan te passen aan de terminologie van het gebruikte handboek. Leerlingen in de eerste graad zijn doorgaans niet geïnteresseerd in te veel details, maar in sterk wetenschappelijk richtingen kan je wel de puntjes op de i zetten. Zorg dat zij nu al het onderscheid zien tussen warmte en thermische energie, of dat ze inzien dat het merendeel van de elektrische energie die we rondom ons hebben geen energiereservoir is maar zich aan het verplaatsen is, net als de stralingsenergie.
- Bij bepaalde energievormen is het moeilijk om er foto's van te nemen. Soms is een foto eerder de suggestie van de energievorm, bijvoorbeeld bij kinetische energie. Het is belangrijk om dat te duiden.

3.7 Arbeid en vermogen

In de tweede graad wordt het begrip energie meestal kwantitatiever aangepakt en gekoppeld aan de begrippen arbeid en vermogen. Meestal komen deze laatste begrippen wat uit de lucht vallen. Nochtans is arbeid niets anders dan de hoeveelheid energie die zich verplaatst onder invloed van de aanwezige krachten en is het vermogen een maat voor de grote van de energiestroom, dus de verplaatste hoeveelheid energie per tijdseenheid.

3.7.1 Het begrip arbeid

Het begrip arbeid wordt grondig besproken in Fysica 1: Mechanica. We beperken ons hier tot de belangrijkste elementen.



Definitie

De arbeid W (de W van 'Work') die op het systeem dat we bestuderen wordt uitgeoefend (door een ander systeem of door de omgeving) wordt gedefinieerd als

$$W = \pm F_{\parallel} \cdot \Delta x,$$

waarbij $F_{\parallel}$ de krachtcomponente is die op ons systeem wordt uitgeoefend in de richting van de verplaatsing met grootte Δx .

De arbeid kan positief of negatief zijn. Als de zin van de verplaatsing en de kracht dezelfde zijn dan spreken we van positieve arbeid. Is de zin van de verplaatsing tegengesteld aan die van de kracht dan is de arbeid negatief.

$[W] = [E] = \text{J}$ met de J van joule

Dus in woorden, de arbeid is de kracht uitgeoefend in de richting van de verplaatsing maal de grootte van die verplaatsing. Arbeid in fysica is dus iets heel anders dan arbeid in het dagelijks taalgebruik. In het Nederlands associëren we arbeid steeds aan moe worden. In de fysica kan je heel moe worden en toch geen arbeid uitoefenen. Als je een paar uur gelezen hebt terwijl je een kind op je arm houdt: geen arbeid want $\Delta x = 0$!¹⁸

Arbeid is gekoppeld aan een proces, niet aan een toestand. Tijdens dit proces wordt energie verplaatst. Als er geen temperatuurverschillen zijn, dan kan men via de wetten van Newton eenvoudig aantonen dat de arbeid gelijk aan de hoeveelheid energie die zich verplaatst heeft tijdens dit proces¹⁹ (Giancoli, 2017). Dus het begrip arbeid koppelt het effect van krachten aan energieveranderingen. Men kan dus stellen dat het verschil in energie ΔE tussen de eindtoestand (E_2) en de begintoestand (E_1),

$$\Delta E = E_2 - E_1 = W.$$

Laten we even naar de tekens kijken.

¹⁸ Er is wel een uitweg uit deze paradox. Om spieren gespannen te houden moeten deze continu kleine bewegingen uitoefenen. Dus de spieren oefenen wel degelijk arbeid uit, alleen zijn de verplaatsingen niet zichtbaar (zolang je niet begint te trillen). Gelukkig hebben 'dode voorwerpen' hier geen energie voor nodig, anders zou de stoel waarop je zit, af en toe eens doodvermoeid in elkaar storten.

¹⁹ In veel handboeken werkt men hier over het arbeid-energie theorema, maar dat is overbodige omweg. Dit theorema gaat enkel over kinetische energie. Men werkt hier beter met de formule voor behoud van mechanische energie die wel de potentiële energie bevat (Giancoli, 2017).

- Als er op ons systeem (vb. een auto) een positieve arbeid wordt uitgeoefend dan neemt de energie van de auto toe (proces type 1). Vermits de kracht op het systeem in de richting van de verplaatsing wordt uitgeoefend gaat de auto versnellen.
- Als er op ons systeem (vb. een auto) een negatieve arbeid wordt uitgeoefend dan neemt de energie van de auto af (proces type 2). Vermits de kracht op de auto tegengesteld is aan de richting van de verplaatsing gaat de auto vertragen.
- Wat ook kan is dat de netto kracht op het systeem nul is (proces type 3). Neem bijvoorbeeld het systeem 'fiets'. De fietser duwt op het systeem door te trappen op de pedalen maar de wind duwt even hard terug. Als de kracht perfect nul is, behoudt de fiets zijn energie en gaat hij/zij niet versnellen of vertragen ($W = 0 \text{ J}$).

Afhankelijk van de context spreekt men van mechanische arbeid of van elektrische arbeid.

3.7.2 Het begrip vermogen

Sjors draagt een zak cement in 10 minuten, één verdieping omhoog en Sjimmie doet hetzelfde in 15 minuten. Beiden hebben dezelfde arbeid verricht maar de een doet dit sneller dan de ander. We vinden dat Sjors het werk beter uitgevoerd heeft.

Mieleke draagt een zak cement in 10 minuten, één verdieping omhoog en Melleke draagt er in dezelfde tijd twee naar boven. Nu vinden we dat Melleke het werk beter uitgevoerd heeft want ze heeft binnen dezelfde tijd dubbel zoveel arbeid verricht.

Petoetje draagt een zak cement in 10 minuten, twee verdiepingen omhoog en Petatje draagt twee zakken cement in 15 minuten, één verdieping naar boven. Oei, nu kunnen we niet zomaar meer op het zicht zeggen wie er het werk het best uitvoert.

In al deze situaties wordt er arbeid verricht maar houden we ook rekening met de tijd waarin die arbeid geleverd wordt. Van zodra de tijdsfactor een rol speelt, hebben we nood aan een nieuwe grootheid die weergeeft hoe groot de verplaatsing van de energie is per tijdseenheid.



Definitie

Vermogen P is de hoeveelheid arbeid die verricht wordt op het systeem per tijdseenheid.

$$P = \frac{W}{\Delta t}.$$

$[P] = \text{W}$ met de W van Watt

Je ziet hier nu twee keer een hoofdletter W verschijnen. De ene keer als symbool voor de grootheid arbeid en de andere keer als symbool voor Watt, de eenheid van vermogen. Je moet dus steeds goed kijken hoe de W geïnterpreteerd moet worden. Je herkent de eenheid omdat er dan een getal voor staat. Eigenlijk kennen we dit probleem al want ook de letter m wordt dubbel gebruikt. Ze wordt gebruikt als symbool voor de grootheid massa maar ook als symbool voor de eenheid van lengte, de meter.

Het begrip vermogen komen we in het dagelijks leven vooral tegen om de grootte van energiestromen weer te geven. Een groot vermogen betekent een grote energiestroom. Dit wil niet alleen zeggen dat er veel energie aanwezig is, maar ook dat de energie snel kan aangeleverd worden. Neem bijvoorbeeld een auto. Hoe groter het vermogen van een auto, hoe groter de arbeid die hij binnen een bepaalde tijd kan leveren. Een auto met een groter vermogen zal dus in een bepaalde tijd een hogere snelheid halen dan een met een lager vermogen. Meestal spreken

we over het vermogen van auto's als we ze met elkaar willen vergelijken. Bij elektrische toestellen zegt het vermogen ons iets over het verbruik. Het vermogen vind je op elk toestel terug, zoek maar naar de eenheid W. Hoe groter het vermogen, hoe meer energie dat toestel per tijdseenheid verbruikt.

We kunnen nu de eenheid 'kilowattuur' verklaren. Veel leerlingen zien 'watt' staan en denken onmiddellijk aan vermogen. Maar er staat niet watt maar wattuur, wat hetzelfde is als watt maal uur.



Definitie

Een kilowattuur (1 kWh) is de arbeid of energie die een toestel van 1 kW omzet gedurende 1 uur (3600 s). Bemerkt dat de h verwijst naar 'hour'.

Dus 1 kilowattuur (1 kWh) = (1 kW) · (3600 s) = 3,6 MJ.

3.8 Warmte versus energie

Warmte staat ten opzichte van thermische energie zoals mechanische arbeid staat ten opzichte van mechanische energie.

In het dagelijks leven gebruiken we de term 'warmte' alsof we weten wat we bedoelen. Maar in het woordenboek (de dikke van Dale) staan wel wat onwetenschappelijke definities: '1. het warm zijn, 2. (natuurkunde) vorm van energie, opgewekt door moleculaire en atomaire beweging, 3. hartstochtelijkheid;= hartelijkheid'. De eerste verwart warmte met de temperatuur (een wetenschapper zou dit tegenspreken door bijvoorbeeld aan te geven dat een perfect geïsoleerd voorwerp warm kan zijn (hoge temperatuur) zonder dat er warmte is). De tweede betekenis slaat de bal nog meer mis. Warmte is geen vorm van energie maar een transport van energie. Wat wel klopt is dat dit transport wordt opgewekt door bewegingen van deeltjes²⁰. De derde betekenis is uiteraard figuurlijk en verwijst naar het aangename gevoel dat mensen aan elkaar kunnen geven. Kortom, een wetenschappelijke definitie dringt zich op.



Definitie

Warmte, Q , is de hoeveelheid energie die overgaat van een lichaam op hoge temperatuur naar een lichaam op lage temperatuur. Warmte is dus de hoeveelheid energie die zich verplaatst tijdens een proces. **Het is dus geen energievorm** die hoort bij een bepaalde toestand van het systeem zoals de thermische energie.

Er is ook een tekenafspraken.

$Q > 0$ als er warmte opgenomen wordt door het bestudeerde systeem en $Q < 0$ als er warmte afgestaan wordt door het systeem.

De eenheid van warmte is de eenheid van energie: de joule. $[Q] = J$

Nog een voorbeeldje dat aangeeft dat ons taalgebruik ons kan misleiden. IJs zullen we nooit associëren met een woord als 'warmte'. Nochtans, als je ijs van -20°C in een superdiepvries van -

²⁰ Meer concreet, het zijn de verschillen in de gemiddelde snelheid van de deeltjes die de microscopische verklaring zijn van warmte.

30°C brengt dan zal het ijs weldegelijk energie afstaan onder de vorm van warmte en nog verder afkoelen. IJs is dan de ‘warme’ stof en de lucht van diepvries is dan de ‘koude’ stof.

Het heeft geen zin om te spreken van ‘warmteoverdracht’ want warmte wordt op zich al gedefinieerd als de overdracht van energie. Met een woord als ‘warmteoverdracht’ zeg je dus eigenlijk twee keer overdracht. Bij ‘warmteoverdracht, warmtetoevoer en warmteafvoer’ is het beter om te spreken van energietoevoer of gewoonweg over warmte.

Zo zijn er nog tal van voorbeelden waar onze moedertaal in conflict gaat met de taal van de fysica. Zo gebruiken we in het dagelijks taalgebruik naast ‘de warmte’ ook ‘de koude’.

Warmte als woord, als grootheid bestaat in fysica. Het werd hierboven gedefinieerd. Koude als woord bestaat niet. Je kan dus niet zeggen ‘Doe de deur dicht zodat de koude buiten blijft.’ Dat houdt geen steek. Je zegt dan beter ‘Doe de deur dicht zodat de koude lucht buiten blijft’.

Het begrip warmte komt later nog grondiger aan bod als we het hebben over het transport van thermische energie, als we de verschillende verschijningsvormen van warmte bestuderen. In dit hoofdstuk is het wel nog van belang om warmte te koppelen aan één van de fundamenteën van de fysica: de wet van behoud van energie.

3.9 De wet van behoud van energie

In vorige paragraaf gaven we aan dat warmte, net als arbeid, een verplaatste hoeveelheid energie is. We bekijken nu het algemene geval waarbij een systeem zowel arbeid en warmteprocessen ondergaat.



Definitie

De wet van behoud van energie geeft aan dat de energieverandering (ΔE) van een systeem de som is van de toegevoegde warmte en arbeid aan het systeem, dus dat $\Delta E = E_2 - E_1 = W + Q$.

Bemerk dat W en Q een teken hebben en ook negatief kunnen zijn, vb. als het systeem arbeid uitoefent op de omgeving of warmte verliest aan de omgeving. De energie van het systeem na deze processen zal dan meetbaar verlaagd zijn.

Deze wet wordt ook de eerste hoofdwet van de thermodynamica genoemd, waarbij thermodynamica slaat op de studie van de thermische processen. Energie kan zich enkel verplaatsen over de grenzen van het systeem via arbeid of warmte. Deze wetmatigheid is een experimentele wet, dit wil zeggen dat we tot nu toe geen experimenten hebben waargenomen die niet aan deze behoudswet voldoen. Tot nader orde blijft het dus een fundamentele natuurwet. Van zodra iemand een fenomeen gevonden heeft waarbij deze wet niet werkt en er een proces is waar meer energie uitkomt dan wat erin gestoken werd of omgekeerd, moet die het zeker laten weten. Die zou er de Nobelprijs voor de fysica mee kunnen winnen.

Als een voorwerp of een systeem een verandering ondergaat, is het interessant om de energiebril op te zetten. Je kijkt dan hoeveel energie er voor de verandering aanwezig is en je kijkt of je diezelfde hoeveelheid energie kan terugvinden na de verandering. Bij het ontspannen van een katapult bijvoorbeeld wordt de elastische energie van de katapult omgezet in bewegingsenergie

van de steen (of een propje). De katapult moet daarvoor in interactie gaan met de steen en oefent een kracht uit. Na dit proces is de elastische energie van de katapult nul geworden maar heeft de steen wel bewegingsenergie gekregen waarmee hij in het luchtledige eindelijk aan dezelfde snelheid rechtdoor kan blijven doorvliegen. Uiteraard gebeurt dat in de praktijk niet en zal het propje stilvallen. De bewegingsenergie heeft zich dan volledig omgezet in thermische energie.

Het omzetten van energievormen (of het verplaatsen van de energie tussen verschillende reservoirs) kan ook binnen het systeem zelf gebeuren. Bij het vallen van een voorwerp wordt immers de gravitationele energie van het voorwerp omgezet in bewegingsenergie van het voorwerp. Maar er is wel een proces, namelijk: het vallen. En er wordt wel een kracht uitgeoefend, namelijk de zwaartekracht.

Merk ook op dat de energievormen (of reservoirs) niet altijd moeten veranderen tijdens processen. Thermische energie van het ene voorwerp kan gerust omgezet worden in thermische energie van het andere voorwerp, bijvoorbeeld bij een koortsthermometer die de temperatuur van een lichaam meet. Ook bij chemische energie en bewegingsenergie komt dit veelvuldig voor.



Oefening

Bekijk verschillende experimenten vanuit het standpunt van de eerste hoofdwet.

- Newtons wieg
- Radiometer van Crookes
- Windmolen
- Batterijlader
- De loop der dingen



Wat is het systeem? Welke energie zat er oorspronkelijk in het systeem. Waar is de energie op het einde van het proces. Welke omzettingen zijn er gebeurd (of welke reservoirs werden gebruikt)?

3.10 Energiebronnen en duurzaamheid

We hebben al een redelijke begrippenlijst rond energie afgewerkt:

- Energievormen:
 - Energie krijgt een verschillende naam afhankelijk van de context (vb. thermische energie, mechanische energie, chemische energie, ...). Het gaat wel steeds over dezelfde energie maar die zit op een andere manier geordend in de materie.
 - Men kan ook stellen dat een energievorm de energie is die in een energiereservoir zit met dezelfde naam.
- Energiereservoir
 - Een ruimtelijke positie die energie bevat. Afhankelijk van de manier waarop de energie geordend wordt krijgt het reservoir een andere naam (thermisch reservoir, mechanisch reservoir, chemisch reservoir, ...).
 - Een energiereservoir bevat de energievorm met dezelfde naam.
- Energiedichtheid
 - De hoeveelheid energie in een kg van een bepaald energiereservoir.
- Energieomzettingen
 - Energie die zich verplaatst van één reservoir naar een ander.
- Energiestroom
 - De energie die zich per tijdseenheid verplaatst tussen verschillende reservoirs. De grootte van de energiestroom wordt weergegeven door het vermogen.

Een laatste begrip dat in een hoofdstuk rond energie niet kan ontbreken is het begrip energiebron. We gaan uit van een pragmatische definitie²¹ waarbij een energiebron datgene is waaraan energie kan worden ontleend. Energiebronnen zijn dus concreter dan energiereservoirs en spelen een heel belangrijke rol in het energievraagstuk. De belangrijkste energiebronnen zijn:

- De eindige energiebronnen die in een beperkte hoeveelheid op de aarde aanwezig zijn:
 - aardolie,

²¹ Als men heel kritisch kijkt kan men het onderscheid maken tussen een energie-omzetter en een energiebron. Een windmolen is een energie-omzetter, terwijl de wind zelf de energiebron is. De zon is een energiebron (bevat kernenergie), maar ook een energieomzetter die die kernenergie omzet in straling.

- aardgas,
- kolen,
- uranium (gebruikt in kerncentrales),
- ...;
- en de duurzame bronnen die niet beperkt zijn in hoeveelheid:
 - waterkracht,
 - windenergie,
 - zonne-energie,
 - geothermische energie,
 - getijdenenergie,
 - ...;



Oefening

Verdiep je in de verschillende energiebronnen. Verzamel zo veel mogelijk data.

- Welke energiebronnen worden op dit moment het meest gebruikt?
 - Zoek data voor België, Europa en de wereld.
- Welke bron is op dit moment het duurst, welke het goedkoopst (per kWh energieopbrengst)
- Voor de eindige bronnen zoek je uit voor hoe lang we nog voorraden hebben.
- Voor de duurzame bronnen zoek je uit wat ons tegenhoudt om ze massaal in te zetten. Wat zijn de nadelen van deze bronnen.

Het al dan niet duurzaam zijn van een energiebron hangt af van de gebruikte definitie van duurzaamheid. Om het broeikaseffect tegen te gaan moeten we zo snel mogelijk stoppen met energiebronnen te verbranden omdat dit de CO₂ concentratie in de lucht doen toenemen. Binnen dit kader wordt uranium heden ten dage soms aanzien als een duurzame energiebron (want CO₂ neutraal). Het probleem van het kernafval laat men dan buiten beschouwing of vindt men minder urgent.

Zelfs duurzame energiebronnen hebben nadelen en gebruiken eindige materialen om deze energie te oogsten (vb. windmolens, zonnepanelen ...) en op te slaan (vb. in batterijen ...). Men kan op dit moment gemakkelijk stellen dat zonnepanelen de goedkoopste leveranciers van energie zijn en dat er voldoende zonne-energie is om aan de volledige energievraag te voldoen. Alleen is die energie overdag en vooral in de zomerperiode beschikbaar. We moeten de geproduceerde elektrische arbeid dus kunnen opslaan in batterijen of in waterstofgas, ofwel over grote wereldwijde netwerken transporteren. En hier wringt het schoentje, deze oplossingen zijn nog steeds heel erg duur en vragen wel veel eindige materialen. Kortom, energie krijg je nooit voor niks. Er hangt altijd een prijskaartje aan.

Daarom dat de beste energie de energie is die je niet gebruikt en in zijn reservoir laat zitten.

3.11 Leerdoelen



Leerdoelen

Na dit hoofdstuk ben je in staat

- het begrip energie te omschrijven en visueel voor te stellen zodat het voor een breed publiek vatbaar wordt;
- preconcepten rond energie in hun status te verlagen;
- de verschillende energievormen en energiereservoirs te omschrijven en met concrete voorbeelden illustreren;
- energiestromen of omzettingen die voorkomen in het dagelijks leven van leerlingen te analyseren aan de hand van Sankey-diagrammen;
- de begrippen arbeid, vermogen, warmte op een eenvoudige manier te linken aan de andere energieconcepten (zoals energiereservoir, energiestroom, verplaatsing van energie, ...);
- de wet van behoud van energie toe te passen op concrete voorbeelden;
- om een eigen, met cijfers onderbouwde visie over duurzame energiebronnen te formuleren waarbij je concrete keuzes die onze maatschappij moet maken voor de energietransitie grondig motiveert ('argumenteren op basis van data').

7. Referenties

- de Poorter, J., de Lange, J., Devoldere, L., Strubbe, K., & van Landeghem, J. (n.d.). *Big ideas-Great STEM: een kader voor het STEM onderwijs*. Retrieved June 27, 2022, from www.bigideas.be
- Feynman, R. P., Leighton, R. B., & Sands, M. L. (1963). *The Feynman lectures on Physics*. Addison-Wesley Publishing Company.
- Feynman, R. P. (Richard P., Leighton, R. B., & Sands, Matthew. (2011). *Six Easy Pieces: Essentials of Physics Explained by Its Most Brilliant Teacher*. 177.
https://books.google.com/books/about/Six_Easy_Pieces.html?hl=nl&id=2OCKrF6YNKEC
- Giancoli, D. C. (2017). *Natuurkunde deel 1: Mechanica en thermodynamica*. Pearson Benelux BV.
- Hammond, R. T. (2007). *Question de forces! : [la physique explique tout]*.
- Hoeveel stroom verbruikt een elektrische auto? - Lumiworld. (n.d.). Retrieved June 14, 2022, from <https://lumiworld.luminus.be/slimme-investeringen/hoeveel-stroom-verbruikt-een-elektrische-auto/>
- James Prescott Joule - Wikipedia. (n.d.). Retrieved June 22, 2022, from https://nl.wikipedia.org/wiki/James_Prescott_Joule
- Janssen, F., & de Hullu, E. (2008). A toolkit for stimulating productive thinking. *Journal of Biological Education*, 43, 21–26. <http://files.4022/2008 Fred Jansen Perspectieven toolkitJBE.pdf>
- Kuhnová, M. (2020). Students' misconceptions about energy. *Kuhnová, M. (n.d.). Students' Misconceptions about Energy.*, 1.
- Millar, R. (2005). *Teaching about energy: Vol. Department* (Issue 2005).
- Millar, R. (2014). Towards a Research-Informed Teaching Sequence for Energy. In *Teaching and Learning of Energy in K – 12 Education* (pp. 187–206). https://doi.org/10.1007/978-3-319-05017-1_11
- Onderwijsdoelen. (n.d.). Retrieved June 16, 2022, from <https://onderwijsdoelen.be/>
- Posner, G. (1982). Accommodation of a scientific conception: toward a theory of conceptual change. *Science Education*, 66, 211–227.
- Sankey Flow Show - Attractive flow diagrams made in minutes! (n.d.). Retrieved June 22, 2022, from <https://www.sankeyflowshow.com/>
- Scanning tunneling microscopy - Wikipedia. (n.d.). Retrieved June 27, 2022, from https://nl.wikipedia.org/wiki/Scanning_tunneling_microscopy
- Scherr, R. E., Close, H. G., Close, E. W., & Vokos, S. (2012). Representing energy. II. Energy tracking representations. *Physical Review Special Topics - Physics Education Research*, 8(2).
<https://doi.org/10.1103/PhysRevSTPER.8.020115>
- Sherman, R. S. (1986). Is It Possible to Teach Energy in Preschool Education. *Thinking: The Journal of Philosophy for Children*, 6(4), 28–36. <https://doi.org/10.5840/thinking1986648>
- Soorten en veranderingen van energie - Behoud van energie | Energiesystemen | Energieoverdracht - PhET Interactieve Simulaties. (n.d.). Retrieved June 20, 2022, from <https://phet.colorado.edu/nl/simulations/energy-forms-and-changes>
- The National Strategies. (2003). *Strengthening teaching and learning of energy, Part 2*.
<https://www.stem.org.uk/rxx74>

Zinsser, J. P., & Hayes, J. C. (2006). *Emilie Du Châtelet: rewriting Enlightenment philosophy and science*. 325.