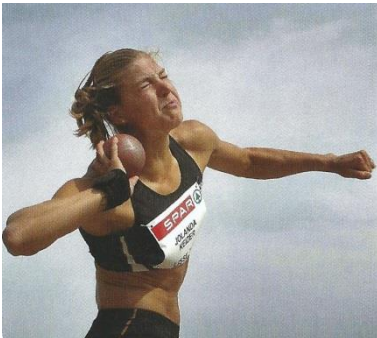


1 Energieomzettingen

Bewegingen in de sport en het verkeer



Inhoud

- 1.1 Inleiding
- 1.2 Energiesoorten
- 1.3 Arbeid
- 1.4 Arbeid en warmte
- 1.5 Rendement
- 1.6 Vermogen
- 1.7 Afsluiting

SLO_KoKo

Lesmateriaalvoorbeeld | Kwadrant A | Illustratieve context

2015 | Koos Kortland



Figuur 1 Bij sporten en in het verkeer is energie nodig.

1.1 Inleiding

Bij sporten zoals hardlopen, wielrennen en schaatsen is het belangrijk dat je een bepaalde afstand in een zo kort mogelijke tijd aflegt. Daarvoor is energie nodig. Die energie haalt je lichaam uit de verbranding van voedsel. Ook in het verkeer is energie nodig. Elke dag zijn in Nederland miljoenen mensen onderweg van huis naar werk of school, en omgekeerd. Een groot deel van dat verkeer is gemotoriseerd. Daarbij wordt brandstof, zoals benzine, dieselolie en lpg, verbruikt. Dit hoofdstuk gaat over de energieomzettingen die nodig zijn voor bewegingen, zoals bij sport en in het verkeer.

Hoofdstukvraag

Welke energieomzettingen zijn er nodig bij bewegingen?

Voorkennis

- 1 Bij bewegingen is sprake van *energieomzettingen*: energie van de ene soort wordt omgezet in energie van een andere soort.
 - a Welke soorten energie ken je? Met welke formule kun je elk van die soorten energie uitrekenen? Wat stellen de symbolen in elk van die formules voor?
 - b Welke energieomzettingen ken je? Geef minstens twee voorbeelden.
 - c Hoe is het rendement van een apparaat gedefinieerd?
 - d Hoe is het vermogen van een apparaat gedefinieerd?
- 2 Bij bewegingen is niet alleen sprake van energieomzettingen. Ook *kracht* en *snelheid* spelen een rol.
 - a Welke soorten kracht ken je? Met welke formule kun je elk van die krachten uitrekenen? Wat stellen de symbolen in elk van die formules voor?
 - b Hoe is de snelheid bij een beweging gedefinieerd?
 - c Hoe is de resulterende kracht (of netto-kracht) op een voorwerp gedefinieerd?
 - d Welk verband is er tussen de resulterende kracht (of netto-kracht) op een voorwerp en de beweging van dat voorwerp?

1.2 Energiesoorten

Bij sporten verbruikt je lichaam energie. Daarmee zet je je eigen lichaam of een ander voorwerp (zoals de kogel bij het kogelstoten) in beweging. Of je lichaam tilt een voorwerp (zoals de halter met gewichten bij het gewichtheffen) op. Die voorwerpen krijgen daardoor energie. Zoiets geldt ook bij het fietsen en autorijden in het verkeer: je lichaam of de automotor verbruiken energie, en je lichaam samen met de fiets of de auto komen in beweging en krijgen energie. De energie die bij bewegingen wordt verbruikt en de energie die voorwerpen daardoor krijgen is per situatie verschillend. Of, met andere woorden: er is sprake van verschillende *energiesoorten*.

Paragraafvraag

Welke energiesoorten spelen een rol bij bewegingen?



Figuur 2 Een kogelstootster geeft kinetische energie aan de kogel.

Kinetische energie

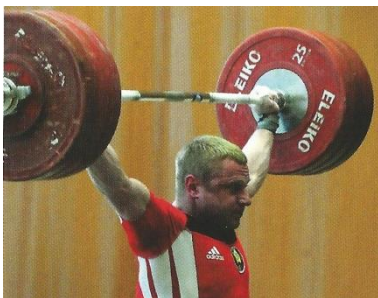
Een voorwerp dat beweegt heeft energie: *kinetische energie* of *bewegings-energie* (symbool: E_k). De kinetische energie van een voorwerp hangt af van de massa en de snelheid van het voorwerp:

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

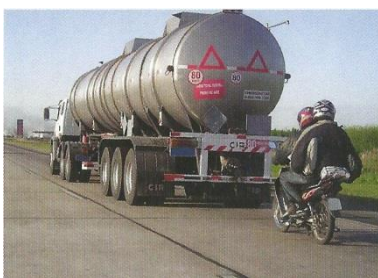
In deze formule is E_k de kinetische energie (in J), m de massa (in kg) en v de snelheid (in m/s) van het voorwerp.

Zwaarte-energie

Een voorwerp dat is opgetild heeft energie: *zwaarte-energie* (symbool: E_z). Zwaarte-energie heeft te maken met zwaartekracht. De zwaartekracht zorgt er bij het vallen voor dat het voorwerp versnelt: een snelheid, en dus kinetische energie krijgt. De zwaarte-energie van een voorwerp hangt af van de massa en de hoogte van het voorwerp:



Figuur 3 Een gewichtheffer geeft zwaarte-energie aan de halter met gewichten.



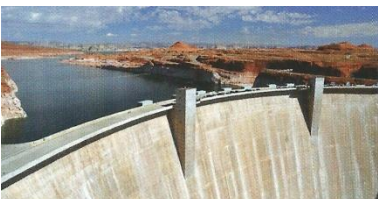
Figuur 4 In een brandstof ligt chemische energie opgeslagen.

Energiesoorten

Naast kinetische energie, zwaarte-energie en chemische energie zijn er nog andere energiesoorten, zoals elektrische energie, veerenergie, stralingsenergie en warmte.



Figuur 5 Een windturbine levert elektrische energie.



Figuur 6 Een waterkrachtcentrale levert elektrische energie met behulp van de energie die in een stuwmeer is opgeslagen.

Paragraafvraag

Welke rol spelen krachten bij energie-omzettingen?

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

In deze formule is E_z de zwaarte-energie (in J), m de massa (in kg) en h de hoogte (in m) van het voorwerp boven de grond. De valversnelling g is $9,8 \text{ m/s}^2$ (op aarde).

Chemische energie

In voedsel of in een brandstof is energie opgeslagen: **chemische energie** (symbool: E_{ch}). Die chemische energie komt vrij bij het verbranden van het voedsel in je lichaam of bij het verbranden van een brandstof als benzine in een motor. De hoeveelheid energie die per kilogram of per liter brandstof vrijkomt, noemen we de **verbrandingswarmte**. De in een brandstof opgeslagen chemische energie hangt af van de massa of het volume en de verbrandingswarmte van de brandstof:

$$E_{\text{ch}} = r_m \cdot m$$

$$E_{\text{ch}} = r_v \cdot V$$

In deze formules is E_{ch} de chemische energie (in J), r_m de verbrandingswarmte (in J/kg), m de massa, r_v de verbrandingswarmte (in J/m³) en V het volume (in m³) van de brandstof.

- 3 De energiebron voor bewegen is meestal chemische energie.
 - a Noem twee voorbeelden van chemische energie.
 - b Leg uit dat in een elektrische auto chemische energie is opgeslagen, maar in een elektrische trein niet.
- 4 In een elektriciteitscentrale staan grote generatoren (dynamo's), die elektrische energie leveren.
 - a Welke soort energie is de energiebron bij conventionele centrales, die op aardgas of steenkool werken?
 - b Welke soort energie is de energiebron bij de windturbines van figuur 5?
 - c Welke soort energie is de energiebron bij de waterkrachtcentrale bij het stuwmeer van figuur 6?
- 5 De vrachtwagen en de motor in figuur 4 rijden met dezelfde snelheid.
 - a Bij welk voertuig is de kinetische energie het grootst?
 - b Bij welk voertuig is de zwaarte-energie het grootst?
 - c Bij welk voertuig is de (opgeslagen) chemische energie het grootst?
- 6 Hoeveel keer zo groot wordt de kinetische energie van je lichaam als je met een $2 \times$ zo grote snelheid gaat fietsen?
- 7 Hoeveel keer zo groot wordt de zwaarte-energie van een voorwerp als het tot een $1,5 \times$ zo grote hoogte wordt opgetild?
- 8 Bepaal in elk van de volgende drie situaties van welke energiesoort er sprake is, en bereken de hoeveelheid energie.
 - a Een auto met een massa van 950 kg rijdt met een constante snelheid van 50 km/h over een vlakke, horizontale weg.
 - b Een gewichtheffer houdt een halter met een massa van 90 kg op een hoogte van 2,3 m boven de grond.
 - c De brandstoftank van een auto bevat 35 L benzine.

1.3 Arbeid

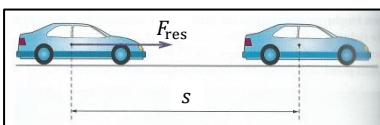
In de sport, in het verkeer, overal is voor bewegen energie nodig, zoals chemische energie. En daarbij krijgen voorwerpen energie, zoals kinetische energie en zwaarte-energie. Of, met andere woorden: bij bewegen wordt de ene energiesoort omgezet in een andere energiesoort. Daarbij spelen krachten een belangrijke rol.

Kracht en arbeid

Een kracht verricht arbeid. Deze arbeid heeft in de natuurkunde een andere betekenis dan in het dagelijks leven. Bij arbeid denk je misschien aan werken in



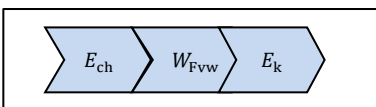
Figuur 7 Bij de start van een sprinter zorgt de spierkracht voor een voorwaartse kracht op het lichaam. Die voorwaartse kracht verricht arbeid, en de kinetische energie van de sprinter neemt toe.



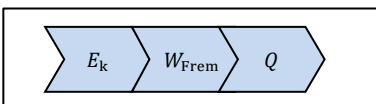
Figuur 8 De verandering van de kinetische energie van een voertuig is gelijk aan de arbeid van de resulterende kracht F_{res} (of netto-kracht) op het voertuig. Bij een resulterende kracht in de bewegingsrichting, neemt de kinetische energie van het voertuig toe (optrekken). Bij een resulterende kracht tegen de bewegingsrichting in, neemt de kinetische energie van het voertuig af (remmen of botsen).

9 W Practicum: arbeid en kinetische energie

In deze opdracht controleer je de wet van arbeid en kinetische energie door metingen aan een bewegend voorwerp op een luchtkussenbaan en aan een remmende fiets.



Figuur 9 Bij optrekken (dus: toenemende snelheid) wordt chemische energie via arbeid van de voorwaartse kracht omgezet in kinetische energie.



Figuur 10 Bij remmen (dus: afnemen van de snelheid) wordt kinetische energie via arbeid van de remkracht omgezet in warmte.

de fabriek, of achter je computer een verslag schrijven. Natuurkundig gezien lever je arbeid als je de trap op klimt, een eind fietst of een plank doorzaagt. De motor van een auto verricht arbeid tijdens het rijden.

De **arbeid** (symbool: W) die een kracht verricht, is de hoeveelheid energie die door de kracht wordt omgezet voor een beweging, zoals traplopen, fietsen, zagen of autorijden. Voor het verrichten van arbeid is niet alleen een kracht nodig, maar ook een verplaatsing. De arbeid hangt af van de kracht en de verplaatsing:

$$W = F \cdot s$$

In deze formule is W de arbeid (in J), F de kracht (in N) en s de verplaatsing (in m). Uit de formule volgt de eenheid van arbeid: *newton-meter* (afgekort: Nm).

Voor deze eenheid geldt: $1 \text{ Nm} = 1 \text{ J}$.

De formule om de arbeid van een kracht te berekenen geldt alleen als de kracht F en de verplaatsing s dezelfde of tegengestelde richting hebben.

Arbeid en kinetische energie

Een voorwerp versnelt of vertraagt door een kracht. Bij het kogelstoten verricht de spierkracht arbeid, en de kinetische energie van de kogel neemt toe. De verandering van de kinetische energie van het voorwerp is gelijk aan de arbeid van de kracht die op het voorwerp werkt. En als er meer dan één kracht op het voorwerp werkt, dan gaat het om de totale arbeid van alle krachten. Dit noemen we de **wet van arbeid en kinetische energie**. In de vorm van een formule is deze wet te schrijven als:

$$W_{\text{tot}} = \Delta E_k$$

In deze formule is W_{tot} de totale arbeid (in J) van alle krachten die op het voorwerp werken, en ΔE_k de verandering van de kinetische energie (in J) van het voorwerp. De totale arbeid is ook op te vatten als de netto-arbeid: de arbeid van de resulterende kracht (of netto-kracht) op het voorwerp (zie figuur 8).

Zwaarte-energie en kinetische energie

De wet van arbeid en kinetische energie is ook toe te passen op een vallend voorwerp. Op een hoogte h boven de grond heeft het voorwerp zwaarte-energie. Tijdens het vallen neemt deze zwaarte-energie af. De zwaartekracht zorgt ervoor dat het voorwerp tijdens het vallen versnelt: de snelheid, en dus de kinetische energie van het voorwerp neemt tijdens het vallen toe. De arbeid die de zwaartekracht verricht, is gelijk aan de verandering van de kinetische energie van het voorwerp: $W_{F_z} = F_z \cdot h = m \cdot g \cdot h = \Delta E_k$. Hierin herkennen we $m \cdot g \cdot h$ als de zwaarte-energie E_z van het voorwerp bij de start van de valbeweging, of als de verandering ΔE_z van de zwaarte-energie van het voorwerp tijdens de val. De wet van arbeid en kinetische energie is dan in dit geval te schrijven als: $\Delta E_z = \Delta E_k$. Maar dat mag alleen als de valbeweging plaatsvindt onder invloed van *alleen* de zwaartekracht. Als er sprake is van een tegenwerkende luchtweerstandskracht, dan wordt een deel van de zwaarte-energie van het voorwerp tijdens de val omgezet in warmte. De kinetische energie van het voorwerp neemt dan minder toe dan de zwaarte-energie van het voorwerp afneemt.

Arbeid en energieomzetting

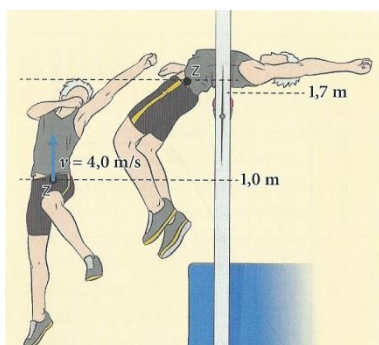
Steeds wanneer een kracht arbeid verricht, wordt er energie omgezet. Chemische energie wordt via arbeid van de spierkracht omgezet in kinetische energie van een voorwerp (bij het omhoog gooien van een kogel, vóór het loslaten). Kinetische energie wordt via arbeid van de zwaartekracht omgezet in zwaarte-energie (bij het omhoog bewegen van de kogel, na het loslaten). Zwaarte-energie wordt via arbeid van de zwaartekracht omgezet in kinetische energie (bij het vallen van de kogel). En kinetische energie wordt via arbeid van de normaalkracht omgezet in warmte (als de vallende kogel de grond raakt).

- 10** Een auto trekt vanuit stilstand over een afstand van 35 m op naar een snelheid van 50 km/h. Neem aan dat de versnelling van de auto constant is. De luchtweerstand wordt verwaarloosd.

Als de auto met dezelfde kracht optrekt naar een snelheid van 100 km/h, is daarvoor een langere tijd en een grotere afstand nodig.

- Leg uit dat de tijd waarin de auto optrekt tot 100 km/h $2 \times$ zo lang is als de tijd bij het optrekken tot 50 km/h.
- Leg uit dat voor het optrekken tot 100 km/h een afstand van 140 m nodig is.

- 11 Met een katapult schiet je een steentje recht omhoog. Geef voor elk van de vier delen van de beweging van het steentje hieronder aan welke energie-omzetting er plaatsvindt en welke kracht daarbij arbeid verricht.
- Het wegschieten van het steentje.
 - Het omhoog bewegen van het steentje na het wegschieten.
 - De val van het steentje.
 - De botsing van het steentje met de grond.
- 12 Een voorwerp valt vanaf een hoogte h zonder luchtweerstand omlaag naar de grond. Laat zien dat de snelheid v waarmee het voorwerp de grond raakt, gegeven wordt door: $v = \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$. Hierin is g de valversnelling.
- 13 Een zwaar en een licht voorwerp worden op dezelfde hoogte losgelaten. De luchtweerstand is verwaarloosbaar.
- Hebben beide voorwerpen dezelfde zwaarte-energie? Zo nee, bij welk voorwerp is de zwaarte-energie het grootst?
 - Leg met behulp van energie uit dat de snelheid waarmee beide voorwerpen de grond raken even groot is.
- 14 Een auto rijdt met een constante snelheid van 30 m/s. Onder normale omstandigheden is de remweg van de auto bij deze snelheid 60 m. Op een glad wegdek is de remkracht $2 \times$ zo klein.
- Wordt de remweg daardoor groter of kleiner?
 - Leg met behulp van het begrip arbeid uit dat de remweg omgekeerd evenredig is met de remkracht.
 - Hoe groot is dan de remweg op een glad wegdek?
Uit veiligheidsoverwegingen halveert de automobilist zijn snelheid.
 - Leg uit of de remweg van de auto op het gladde wegdek nu weer 60 m is, of groter of kleiner.
- 15 Een hoogspringer met een massa m van 60 kg komt met een verticale snelheid v van 4,0 m/s los van de grond. Tijdens de hele beweging is de luchtweerstand verwaarloosbaar klein. Om erachter te komen of de hoogspringer in de situatie van figuur 11 over de lat heen komt, moet je bepalen welke hoogte zijn zwaartepunt maximaal bereikt. Daarbij hoef je geen rekening te houden met de beweging van de hoogspringer in de horizontale richting.
- Bereken de kinetische energie van de hoogspringer vlak ná de afzet.
 - Hoe groot is dan zijn zwaarte-energie in het hoogste punt van de beweging?
 - Welke hoogte bereikt zijn zwaartepunt maximaal?



Figuur 11 Het lichaam van de hoogspringer bij de afzet en in het hoogste punt van de sprong.

Paragraafvraag

Welke rol spelen wrijvingskrachten bij energieomzettingen?

1.4 Arbeid en warmte

Bij hardlopen, fietsen en zwemmen moet je voortdurend energie leveren om in beweging te blijven. De voortwaartse kracht verricht voortdurend arbeid. Toch neemt de kinetische energie van je lichaam niet toe, want de snelheid is constant. Er vindt dus een andere energieomzetting plaats. Dat heeft te maken met de tegenwerkende wrijvingskrachten.

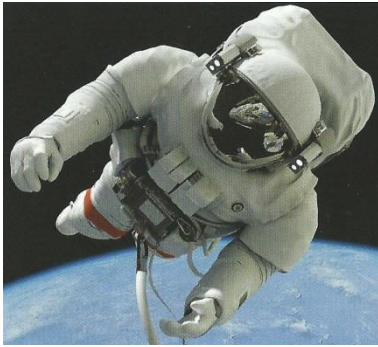
Wrijvingsarbeid

Bij hardlopen, fietsen en zwemmen is een kracht nodig om de beweging in stand te houden, tegen de tegenwerkende wrijvingskrachten in. De geleverde energie wordt omgezet in een andere energiesoort: **warmte**.

Als je in je handen wrijft, voel je dat je handen warm worden. Er wordt chemische energie via beweging omgezet in warmte. Deze omzetting noemen we **wrijvingsarbeid**.

Rol- en luchtweerstand

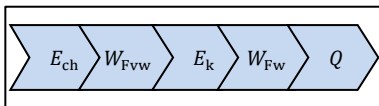
Bij bewegen is de luchtweerstand vaak een belangrijke 'tegenstander'. Want door die luchtweerstand wordt er voortdurend energie van de beweging omgezet in warmte. Deze warmte wordt afgegeven aan de lucht en het oppervlak waar die lucht langs stroomt. Daar merk je normaal gesproken niets van, want de



Figuur 12 In de ruimte is er geen lucht en dus ook geen luchtweerstand. Er is daar dan ook geen kracht nodig om een beweging in stand te houden: satellieten draaien rondjes om de aarde zonder energie te gebruiken.



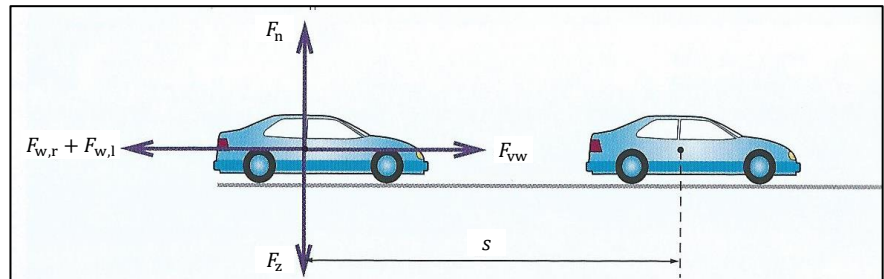
Figuur 13 De invloed van luchtweerstand is goed merkbaar als een ruimtecapsule terugkeert in de dampkring van de aarde. Er is dan zelfs een hittedeksel nodig om te voorkomen dat de capsule smelt.



Figuur 15 Bij rijden met constante snelheid wordt chemische energie via arbeid van de voorwaartse kracht omgezet in kinetische energie, en uiteindelijk via wrijvingsarbeid van de tegenwerkende krachten omgezet in warmte.

temperatuurstijging is heel klein en de langsstromende lucht zorgt ook voor afkoeling.

Als je met de fiets of auto op een vlakke, horizontale weg rijdt, zijn de rol- en luchtweerstandskracht $F_{w,r}$ en $F_{w,l}$ de enige tegenwerkende krachten. Bij een constante snelheid is er sprake van krachtenevenwicht: in de horizontale richting is de voorwaartse kracht F_{vw} op de fiets of auto precies even groot als de totale tegenwerkende kracht. Dus: $F_{vw} = F_{w,r} + F_{w,l}$.



Figuur 14 De voorwaartse kracht F_{vw} verricht arbeid en zorgt daarmee voor de omzetting van chemische energie in kinetische energie. De tegenwerkende krachten $F_{w,r}$ en $F_{w,l}$ verrichten wrijvingsarbeid, en zorgen daarmee voor een omzetting van kinetische energie in warmte.

De snelheid, en dus ook de kinetische energie van de fiets of auto blijft gelijk. De energie die de motor omzet in kinetische energie is dan even groot als de kinetische energie die door wrijving wordt omgezet in warmte.

- 16 Leg uit waardoor de remmen van een fiets of auto tijdens het remmen warm worden.
- 17 Bij het sporten krijg je het al snel warm.
 - a Waar komt die warmte vandaan?
 - b Leg uit dat de energie die voor bewegen gebruikt wordt, uiteindelijk ook wordt omgezet in warmte.
 - c Waardoor heb je bij fietsen en skeeleren minder snel last van de warmte dan bij hardlopen?
- 18 Een parachutist daalt met een constante snelheid. Van welke energie-omzettingen is bij deze beweging sprake? Geef bij elke energieomzetting aan welke kracht daarbij arbeid verricht.
- 19 Als een auto een bepaalde afstand rijdt, verricht de voorwaartse kracht op de auto arbeid.
 - a Hoeveel keer zo groot is deze arbeid als de auto met dezelfde snelheid een $3 \times$ zo grote afstand aflegt?
 - b Hoeveel keer zo groot is deze arbeid als de auto een $3 \times$ zo grote afstand aflegt met een $2 \times$ zo grote voorwaartse kracht, waardoor de snelheid groter is?
 - c Welke andere krachten verrichten ook nog arbeid op de auto?
 - d Noem een kracht die op de auto werkt zonder arbeid te verrichten.
- 20 Bij een snelheid van 90 km/h verbruikt een auto 6,7 L benzine voor het afleggen van een afstand van 100 km. De tegenwerkende krachten zijn bij die snelheid in totaal 480 N.
 - a Bereken de verbruikte hoeveelheid chemische energie bij het afleggen van een afstand van 100 km.
 - b Bereken de arbeid die de motor heeft verricht tijdens de rit.
 - c Bereken de warmte die tijdens de rit is afgegeven aan de omgeving (inclusief de auto zelf).

1.5 Rendement

Bij het verbranden van brandstof komt warmte vrij. Deze warmte is rechtstreeks

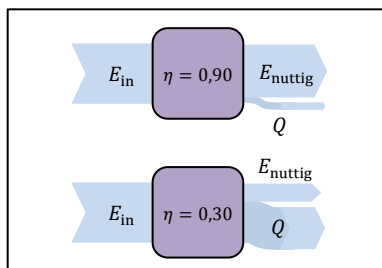
Paragraafvraag

Hoe groot is het rendement van energieomzettingen?

De mens als energieomzetter

Ook het menselijk lichaam is een energieomzetter: chemische energie (uit voedsel) wordt omgezet in arbeid en warmte. De spieren verrichten arbeid bij lopen, fietsen, tillen enzovoort.

Het rendement van het menselijk lichaam hangt af van de soort activiteit. Fietsen is de meest efficiënte manier van voortbewegen, met een rendement van zo'n 0,25 (of 25%). Bij hardlopen en schaatsen is het rendement van het lichaam lager. Dat komt doordat bij deze manieren van voortbewegen een groter deel van het mechanisch vermogen nodig is voor de slingerbeweging van de benen, bij hardlopen nog meer dan bij schaatsen.



Figuur 18 Energieomzetting met een hoog rendement (boven) en een laag rendement (onder).

te gebruiken voor woningverwarming of warmwatervoorziening. Deze warmte is ook te gebruiken om een automotor te laten draaien. De motor levert dan arbeid. In een elektriciteitscentrale is deze warmte te gebruiken voor de productie van stoom om een turbine-generatorcombinatie te laten draaien. De centrale levert dan elektrische energie om bijvoorbeeld een elektromotor te laten draaien of een lamp te laten branden.

In al deze gevallen is sprake van een energieomzetting: chemische energie (in brandstof) wordt rechtstreeks omgezet in warmte, of via één of meer tussenstappen in arbeid, elektrische energie, kinetische energie of stralingsenergie. De vraag is nu hoe goed apparaten als een cv-ketel, geiser, motor, elektriciteitscentrale en lamp hun werk doen. Zulke apparaten noemen we energieomzetters.

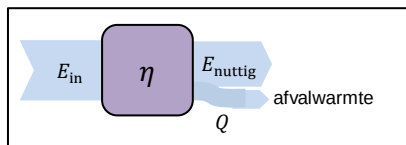
Energiebehoud

Bij elke energieomzetting is de totale hoeveelheid energie die de energieomzetter *in* gaat even groot als de totale hoeveelheid energie die de energieomzetter *uit* komt. Met andere woorden: bij elke energieomzetting blijft de totale hoeveelheid energie *behouden*. Dit noemen we de **wet van behoud van energie**. In de vorm van een formule is deze wet te schrijven als:

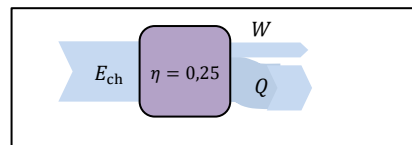
$$E_{\text{tot,in}} = E_{\text{tot,uit}}$$

In deze formule zijn $E_{\text{tot,in}}$ en $E_{\text{tot,uit}}$ de totale hoeveelheid energie (in J) die de energieomzetter in gaat en uit komt.

Maar bij elke energieomzetting wordt slechts *een deel* van de toegevoerde energie omgezet in een nuttige (of gewenste) energiesoort. De rest gaat verloren in de vorm van warmte. Die warmte – waar we niets mee doen – zouden we **afvalwarmte** kunnen noemen (zie figuur 16).



Figuur 16 Energie-stroomdiagram van een energieomzetter: van de omgezette energie E_{in} komt slechts een deel vrij als nuttige, gewenste energie E_{nuttig} .



Figuur 17 Energie-stroomdiagram van een automotor: van de omgezette chemische energie E_{ch} komt 25% vrij als nuttige arbeid W voor de voortbeweging.

Rendement

Het rendement van een energieomzetter geeft aan welk deel van de omgezette energie wordt geleverd in de vorm van nuttige (of gewenste) energie:

$$\eta = \frac{E_{\text{nuttig}}}{E_{\text{in}}}$$

In deze formule is η het rendement (zonder eenheid), E_{nuttig} de geleverde nuttige energie (in J) en E_{in} de omgezette energie (in J).

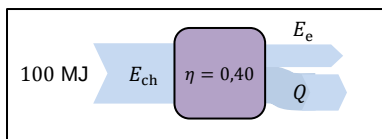
In deze formule mag je de energie E ook vervangen door het vermogen P . Want: het gaat om de nuttige en omgezette energie in dezelfde tijdsduur. Bij een tijdsduur van 1 s is deze energie gelijk aan het vermogen:

$$\eta = \frac{P_{\text{nuttig}}}{P_{\text{in}}}$$

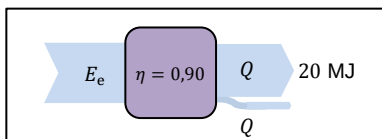
In deze formule is η het rendement (zonder eenheid), P_{nuttig} het geleverde nuttige vermogen (in W) en P_{in} het omgezette vermogen (in W).

Het rendement kan worden opgegeven als getal of in de vorm van een percentage. Met de twee formules hierboven bereken je het rendement in de vorm van een getal. Met als resultaat bijvoorbeeld een rendement van 0,21. Dit is dan ook op te geven in de vorm van een percentage: een rendement van $0,21 \cdot 100\% = 21\%$.

Het rendement van een energieomzetter is altijd kleiner dan 1 (of 100%), omdat de geleverde nuttige energie altijd slechts *een deel* is van de omgezette energie. In figuur 18 zie je: hoe groter het rendement is, des te groter is het deel dat wordt omgezet in nuttige energie en des te kleiner is het deel dat wordt omgezet in (ongebruikte) afvalwarmte. Met andere woorden: hoe groter het rendement is,



Figuur 19 Energie-stroomdiagram van een elektriciteitscentrale.



Figuur 20 Energie-stroomdiagram van een elektrische boiler.

26 W Practicum: rendement meten

In deze opdracht meet je het rendement van een of meer energieomzetters, zoals een kookplaat, een elektromotor en een gloeilamp.

Paragraafvraag

Welk verband is er tussen voorwaartse kracht, snelheid en vermogen?

27 W Practicum: vermogen meten

In deze opdracht meet je het mechanisch vermogen van je eigen lichaam.

des te beter doet een energieomzetter zijn werk.

21 In figuur 19 zie je het energie-stroomdiagram van een energieomzetter: een elektriciteitscentrale.

a Bereken de hoeveelheid elektrische energie en de hoeveelheid afvalwarmte die de energieomzetter levert.

b Bereken de hoeveelheid aardgas die de energieomzetter verbruikt.

22 In figuur 20 zie je het energie-stroomdiagram van een energieomzetter: een elektrische boiler.

a Bereken de hoeveelheid elektrische energie die de energieomzetter verbruikt.

b Bereken de hoeveelheid afvalwarmte die de energieomzetter levert.

23 Voor normaal fietsen met een snelheid van 25 km/h moet het menselijk lichaam een vermogen van zo'n 125 W leveren. Het door het lichaam omgezette vermogen is daarbij zo'n 625 W. Bereken het rendement van het menselijk lichaam bij deze manier van voortbewegen.

24 Een gasgestookte elektriciteitscentrale met een rendement van 0,40 (of 40%) levert een elektrisch vermogen van 65 MW. Bereken het brandstofverbruik van de centrale (in m³ aardgas per jaar).

25 Een spaarlamp met een elektrisch vermogen van 18 W geeft evenveel licht als een gloeilamp van 75 W. Het rendement van een gloeilamp is 0,09 (of 9%). Bereken het rendement van de spaarlamp.

1.6 Vermogen

De voorwaartse kracht op een rijdende auto verricht arbeid. Dat geldt ook voor de voorwaartse kracht op het menselijk lichaam op de sprint of de marathon. Daarbij is niet alleen de hoeveelheid arbeid van belang, maar ook de tijd waarin die arbeid moet worden verricht. Als een auto hard rijdt, is een grote voorwaartse kracht nodig en wordt per seconde een grote afstand afgelegd. De motor levert dan in korte tijd veel arbeid. Of, met andere woorden: het vermogen van de motor moet groot zijn. En in de sport moet het lichaam op de sprint en de marathon een verschillend vermogen leveren.

Arbeid en vermogen

Bij het rijden levert een motor arbeid. Die arbeid wordt geleverd in een bepaalde tijd. De arbeid die de motor per seconde levert, noemen we het **mechanisch vermogen** (symbool: P_m) van de motor:

$$P_m = \frac{W}{t}$$

In deze formule is P_m het mechanisch vermogen (in J/s of W), W de geleverde arbeid (in Nm of J) en t de tijdsduur (in s) waarin de arbeid wordt geleverd.

Uit de formule volgt de eenheid van mechanisch vermogen: *joule per seconde* (afgekort: J/s). Dit is – net als bij het eerder behandelde elektrisch vermogen – hetzelfde als de eenheid *watt* (afgekort: W): 1 J/s = 1 W.

Snelheid en vermogen

Een voertuig dat met een constante snelheid v rijdt, legt in een bepaalde tijd t een afstand s af. Voor de constante snelheid van dat voertuig geldt: $v = s/t$.

Om een voertuig met een bepaalde (constante) snelheid te laten rijden, moet de motor een bepaald mechanisch vermogen leveren. Het verband tussen dit mechanisch vermogen en de snelheid is af te leiden uit de arbeidsformule: $W = F_{vw} \cdot s$. Voor het mechanisch vermogen geldt dan: $P_m = W/t = F_{vw} \cdot s/t$. Hierin is s de afstand die wordt afgelegd, en t de tijd waarin dat gebeurt. De breuk s/t in de formule is niets anders dan de snelheid. Het vervangen van de breuk s/t door de snelheid v levert de volgende formule voor het mechanisch vermogen:

$$P_m = F_{vw} \cdot v$$

De mens als motor

Ook het menselijk lichaam kan arbeid verrichten. De per seconde geleverde arbeid (dus: het mechanisch vermogen) kan groot of klein zijn. Hoe groter het mechanisch vermogen is, des te korter kan het lichaam arbeid verrichten. Met andere woorden: des te sneller raakt het lichaam te vermoeid.

Topsporters met een goed getraind lichaam kunnen zo'n 10 minuten een mechanisch vermogen van 500 W leveren, en 400 W gedurende een langere periode van enkele uren. Het maximale mechanisch vermogen is zo'n 1500 W, maar dit houdt het lichaam maar korte tijd vol.



Figuur 21 Bij een mechanisch vermogen van 400 W bereikt een wielrenner een snelheid van zo'n 50 km/h.

In deze formule is P_m het mechanisch vermogen (in J/s of W), F_{vw} de voorwaartse kracht (in N) en v de snelheid (in m/s).

- 28** De motor van een auto levert bij een snelheid van 100 km/h een mechanisch vermogen van 25 kW.
- a** Bereken de arbeid die de motor verricht tijdens een rit van 1,5 uur.
- b** Bereken de voorwaartse kracht op de auto tijdens deze rit.
- 29** Een zwemmer legt de 400 m vrije slag af in een tijd van 4,00 minuten en levert daarbij 144 kJ arbeid.
- a** Bereken de voorwaartse kracht op de zwemmer tijdens de race.
- b** Bereken het mechanisch vermogen van de zwemmer.
- 30** Voor het leegpompen van een kelder moet $4,4 \text{ m}^3$ water binnen een tijd van 1,5 uur over een afstand van 1,3 m omhoog worden gepompt. Bereken hoe groot het mechanisch vermogen van de waterpomp minstens moet zijn.
- 31** Leg uit waardoor bij een $2 \times$ zo grote snelheid het mechanisch vermogen méér dan $2 \times$ zo groot moet zijn.
- 32** Een wielrenner kan gedurende een lange tijd een mechanisch vermogen van 400 W leveren. De voorwaartse kracht op de wielrenner hangt onder andere af van zijn snelheid v . Bij een voorovergebogen houding van de wielrenner wordt deze voorwaartse kracht gegeven door: $F_{vw} = 0,16 \cdot v^2$. Deze voorwaartse kracht is gelijk aan de tegenwerkende luchtweerstandskracht. De tegenwerkende rolweerstandskracht wordt dus verwaarloosd.
- a** Bereken de snelheid van deze wielrenner.
- b** Leg uit waardoor in de praktijk de snelheid van deze wielrenner wat kleiner zal zijn.

1.7 Afsluiting

Samenvatting

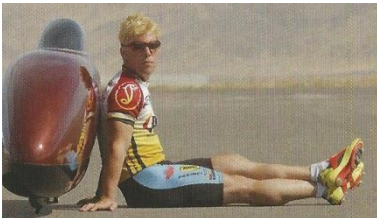
De inhoud van dit hoofdstuk over energieomzettingen is als volgt samen te vatten.

- Energie is te onderscheiden in verschillende energiesoorten: kinetische energie, zwaarte-energie, chemische energie en warmte (maar ook elektrische energie, veerenergie en stralingsenergie).
 - Bij een energieomzetting wordt de ene energiesoort omgezet in één of meer andere energiesoorten.
 - Een energieomzetting wordt veroorzaakt door de arbeid van één of meer krachten.
 - Bij een energieomzetting zonder tegenwerkende wrijvingskrachten geldt de wet van arbeid en kinetische energie.
 - Bij een energieomzetting met tegenwerkende wrijvingskrachten wordt de wrijvingsarbeid van deze krachten omgezet in warmte.
 - Bij elke energieomzetting geldt de wet van behoud van energie: de totale energie die een energieomzetter in gaat is gelijk aan de totale energie die de energieomzetter uit komt.
 - Bij elke energieomzetting ontstaat afvalwarmte, waardoor het rendement van een energieomzetter altijd kleiner dan 1 (of 100%) is: de geleverde nuttige energie is kleiner dan de omgezette energie.
 - Het mechanisch vermogen is de door een kracht per seconde verrichte arbeid, en hangt bij bewegingen af van de kracht en de snelheid.
- 33** Maak een overzicht van de formules die bij energieomzettingen een rol spelen. Geef bij elk symbool in die formules aan welke grootheid dat symbool voorstelt, en wat de bijbehorende eenheid is.
- 34** Maak een begrippenweb over energieomzettingen waarin je laat zien welke verbanden er zijn tussen de verschillende grootheden uit de samenvatting hierboven. Vul het begrippenweb waar mogelijk aan met de formules voor het

verband tussen de verschillende grootheden uit opdracht 33.

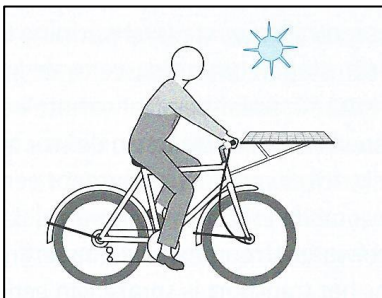
Eindopgaven

- 35** Bij de 100 m sprint en bij een marathon levert het lichaam van de atleet een mechanisch vermogen. Tijdens de wedstrijd is de voorwaartse kracht op de sprinter ruwweg $4 \times$ zo groot als die op de marathonloper.
- a** Maak een schatting van de (gemiddelde) snelheid van een atleet op de sprint en op de marathon. Bedenk daarbij om welke afstanden en tijden het bij dit soort atletiekwedstrijden ruwweg gaat.
- b** Hoeveel keer zo groot (ongeveer) is dan het mechanisch vermogen van de sprinter, vergeleken met dat van de marathonloper?
In paragraaf 1.6 staan gegevens over het mechanisch vermogen dat een goed getraind menselijk lichaam kan leveren, afhankelijk van de tijdsduur van de inspanning.
- c** Maak op grond van die gegevens een schatting van het mechanisch vermogen van de marathonloper.
- d** Hoe groot zal het mechanisch vermogen van de sprinter dan (ongeveer) zijn?



Figuur 22 Sam Whittingham met zijn racefiets Varna.

- 36** In figuur 22 zie je één van de snelste fietsen ter wereld en Sam Whittingham, de wereldrecordhouder uit 2007. Zijn snelheidsrecord is 130,1 km/h, zijn uurrecord is 86,5 km. De snelheden die ligfietsen halen, zijn vooral het resultaat van het verlagen van de luchtweerstand. Voor de luchtweerstand geldt de volgende formule:
- $$F_{w,l} = \frac{1}{2} \cdot c_w \cdot A \cdot \rho \cdot v^2$$
- Deze formule wordt vaak vereenvoudigd tot:
- $$F_{w,l} = k \cdot v^2$$
- De racefiets van Sam heet de Varna. Voor de Varna geldt: luchtweerstandscoefficiënt $c_w = 0,11$ en frontale oppervlakte $A = 0,30 \text{ m}^2$. De luchtdichtheid ρ bij het vestigen van het record was $1,09 \text{ kg/m}^3$.
- a** Laat met een berekening zien dat voor de Varna geldt: $k = 0,018 \text{ N s}^2/\text{m}^2$.
Voor beide records is niet alleen een snelle fiets maar ook een goede coureur nodig. Sam leverde bij beide prestaties een behoorlijk groot vermogen. De rolweerstand van de Varna bedraagt 3,1 N.
- b** Bereken voor beide records welk vermogen Sam moest leveren.
- c** Welke topsnelheid (in km/h) zou jij ongeveer kunnen halen in de Varna? Verwaarloos bij je berekening de rolweerstand en neem aan dat je een maximaal vermogen van 400 W kunt leveren.



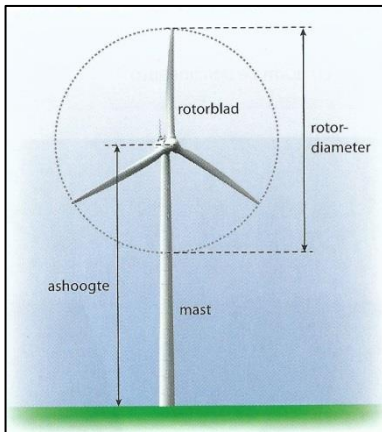
Figuur 23 Fietsen op zonne-energie. Als de accu door het zonnepaneel is volgeladen, kan deze fiets een afstand van bijna 50 km afleggen. Schijnt onderweg de zon, dan haalt de fiets een snelheid van 13 km/h zonder de accu te gebruiken.

- 37** De fiets in figuur 23 is voorzien van een zonnepaneel. De zonnecellen op dat paneel zetten de invallende stralingsenergie van de zon om in elektrische energie. Een elektromotor zorgt vervolgens voor de aandrijving. In de tabel van figuur 24 staan enkele technische gegevens van deze zonnefiets. Ga met een berekening na of deze fiets op een zonnige dag inderdaad – zoals in het onderschrift van figuur 23 staat – een snelheid van 13 km/h haalt zonder de accu te gebruiken.

stralingsintensiteit (op een zonnige dag)	I	500 W/m ²
oppervlakte zonnepaneel	A	0,70 m ²
rendement zonnepaneel	η_{zp}	0,10 (of 10%)
rendement elektromotor en overbrenging	η_{em}	0,50 (of 50%)
totale wrijvingskracht (bij een snelheid van 13 km/h)	F_w	5 N

Figuur 24

- 38** Een middelgrote windturbine heeft een maximaal elektrisch vermogen van 3 MW en een 80 tot 100 m hoge mast. De rotordiameter is 65 m (zie figuur 25). Zo'n windturbine produceert op land ruim 6,5 miljoen kWh per jaar. Dat is voldoende elektrische energie voor bijna tweeduizend woningen.
- a** Het rotoroppervlak waar de wind doorheen waait heeft de vorm van een cirkel. Ga met een berekening na dat die cirkel een oppervlakte heeft van $3,3 \cdot 10^3 \text{ m}^2$.
Het maximale vermogen wordt bereikt bij een windsnelheid van 12 m/s. De



Figuur 25 Windturbine

- dichtheid van de lucht is $1,2 \text{ kg/m}^3$.
- b** Bereken de massa van de lucht die per seconde door het rotoroppervlak waait.
 - c** Bereken de kinetische energie van de lucht die per seconde door het rotoroppervlak waait.
 - d** Leg uit waardoor het elektrisch vermogen (veel) lager is dan de kinetische energie van de lucht die per seconde door het rotoroppervlak waait. Bij lagere windsnelheden dan 12 m/s is de kinetische energie van de wind ook lager.
 - e** Leg uit dat bij een windsnelheid van $6,0 \text{ m/s}$ de kinetische energie van de lucht die per seconde door het rotoroppervlak waait slechts $12,5\%$ is van de kinetische energie bij een windsnelheid van 12 m/s . Het rendement van een windturbine is niet afhankelijk van de windsnelheid.
 - f** Bereken het elektrisch vermogen van de windturbine bij een windsnelheid van $4,0 \text{ m/s}$.
- 39** In de Belgische Ardennen ligt de centrale van Coo-Trois-Ponts met een spaarbekken op 270 m boven de centrale. Per seconde stroomt er maximaal 500 m^3 water omlaag. De zwaarte-energie van het water wordt met een rendement van 85% omgezet in elektrische energie.
- a** Bereken de massa van 500 m^3 water.
 - b** Bereken de zwaarte-energie van 500 m^3 water op een hoogte van 270 m .
 - c** Bereken de snelheid waarmee het water onderaan bij de centrale uit de buis stroomt.
 - d** Bereken het elektrisch vermogen van de centrale. De centrale wordt ingezet om pieken in het elektriciteitsverbruik op te vangen. 's Nachts wordt het spaarbekken opnieuw gevuld door het water weer omhoog te pompen. De centrale kan 6 uur lang het maximale vermogen leveren.
 - e** Bereken hoeveel m^3 water in 6 uur naar beneden stroomt.
 - f** Bereken hoeveel elektrische energie de centrale in die 6 uur levert. Met deze opslag van energie kan geld verdiend worden, omdat de prijs van elektriciteit 's nachts lager is dan overdag: $\text{€ } 0,02$ per MJ 's nachts tegenover $\text{€ } 0,04$ per MJ overdag. Voor het oppompen van 1 m^3 water is $2,9 \text{ MJ}$ elektrische energie nodig.
 - g** Bereken hoeveel geld er per dag maximaal verdiend kan worden met dit systeem.

