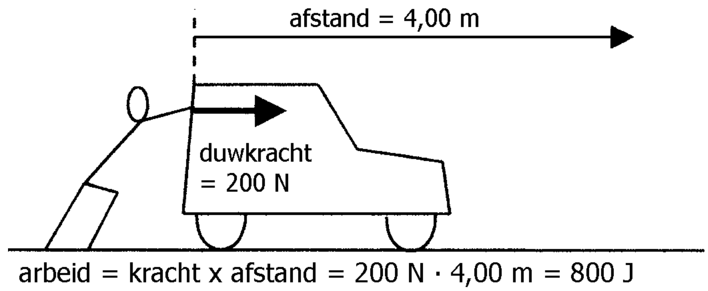
ARBEID EN ENERGIE

§ 1 Arbeid

Voorbeeld

Kees heeft een auto die startproblemen heeft. Hij duwt zijn auto over een afstand van 4,00 m naar voren met een kracht van 200 N. Zie de figuur hiernaast.



Kees moet zich hierbij inspannen. Hij wordt door het duwen moe. Om aan te geven hoe groot de lichamelijke inspanning van Kees is, kunnen we gebruik maken van de natuurkundige grootheid 'arbeid'.

Uit ervaring weet je dat Kees meer arbeid verricht als zijn duwkracht groter is. Bovendien verricht hij meer arbeid als hij zijn auto over een grotere afstand vooruit duwt. Het is daarom logisch dat de geleverde arbeid berekend wordt met de regel:
arbeid = kracht x afstand

In het voorbeeld geldt dus: arbeid = 200 newton x 4,00 meter = 800 newtonmeter.
Een andere naam voor newtonmeter is de **joule** (spreek uit: zjoel).
De geleverde arbeid in ons voorbeeld is dus 800 joule of kortweg 800 J.

Arbeid

De hier van belang zijnde grootheden en eenheden zijn in de onderstaande tabel opgesomd.

Grootheid	Eenheid
kracht F	newton (afgekort N)
afstand s	meter (afgekort m)
arbeid W	joule (afgekort J = Nm)

De letters F en W zijn afkomstig van de Engelse woorden force (= kracht) en work (= arbeid).
De letter s is afkomstig van het Latijnse woord "spatium" wat afstand betekent.
De formule voor de arbeid wordt dan:

$$W = F \times s$$

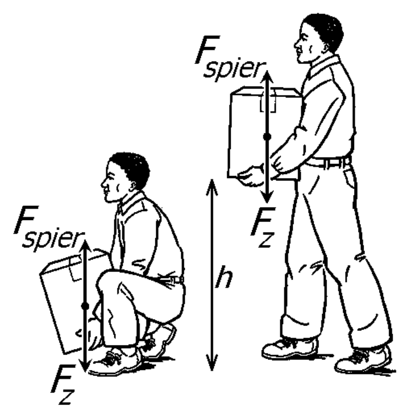
Deze formule kan in twee andere vormen geschreven worden namelijk:

$$F = \frac{W}{s} \qquad \text{en} \qquad s = \frac{W}{F}$$

Opmerkingen
1)
In het dagelijks leven wordt arbeid verricht door een mens, dier of machine. In de natuurkunde wordt arbeid echter verricht door een kracht.
2)
De formule W = F • s geeft aan dat een kracht alleen arbeid verricht als er sprake is van een verplaatsing. Zo verricht de duwkracht van Kees (in het bovenstaande voorbeeld) geen arbeid als de auto stil staat.
3)
De formule W = F • s geldt alleen als de kracht in dezelfde richting wijst als de verplaatsing. Andere gevallen worden hier buiten beschouwing gelaten.

De verrichte arbeid bij het optillen van een voorwerp

In de figuur hiernaast tilt een man een doos op. Op de doos werken twee krachten, namelijk zijn zwaartekracht F_z en de spierkracht F_{spier} van de man. In de figuur zijn deze krachten getekend als pijlen die vertrekken vanuit het zwaartepunt van de doos (dikke stip). In werkelijkheid ligt het aangrijpingspunt van de spierkracht natuurlijk bij de onderzijde van de doos.



Zolang de doos gelijkmatig stijgt, zijn de zwaartekracht en de spierkracht even groot. In het begin moet de doos in beweging gebracht worden en is de spierkracht een beetje groter dan de zwaartekracht. Aan het eind moet de doos weer afremmen en is de spierkracht een beetje kleiner dan de zwaartekracht. Gemiddeld genomen is de spierkracht echter gelijk aan de zwaartekracht.

Stel dat de doos een massa m heeft. Voor de zwaartekracht geldt dan: $F_z = m \cdot g$.
In deze formule is g de gravitatieversnelling. Op aarde geldt g = 9,8 N/kg.
Voor de (gemiddelde) spierkracht bij het optillen geldt dus ook: $F_{SPIER} = m \cdot g$
Als de doos over afstand h omhoog gebracht wordt, verricht de spierkracht een arbeid van: $W = F_{SPIER} \cdot h$.
Bij gegeven m kan deze arbeid rechtstreeks berekend worden met: $W = m \cdot g \cdot h$.

Voorbeeld
Stel bijvoorbeeld dat de doos een massa heeft van 5,2 kg.
Voor de zwaartekracht op de doos geldt dan:

$$F_Z = m \cdot g = 5{,}2\,\text{kg} \cdot 9{,}8\,\text{N/kg} = 51\,\text{N}$$

Om de doos op te tillen, moet de (gemiddelde) spierkracht ook 51 N zijn.
Als de doos 1,2 m omhoog getild wordt, bedraagt de benodigde arbeid:

$$W = F_{SPIER} \cdot h = 51\,\text{N} \cdot 1{,}2\,\text{m} = 61\,\text{J}$$

Deze arbeid had als volgt in één keer uitgerekend kunnen worden.

$$W = m \cdot g \cdot h = 5{,}2\,\text{kg} \cdot 9{,}8\,\text{N/kg} \cdot 1{,}2\text{m} = 61\,\text{J}.$$

Opgaven bij § 1

Opgave 1
Schrijf de formule op voor arbeid zoals die in deze paragraaf behandeld wordt.

Opgave 2
Wat is de eenheid van arbeid?

Opgave 3
Stel je duwt een kar over een afstand van 8,00 m vooruit met een kracht van 40,0 N. Bereken dan de arbeid die je duwkracht verricht.

Opgave 4
Je tilt een koelkast 30,0 cm omhoog. Je spierkracht verricht hierbij een arbeid van 120 J. Bereken hoe groot deze spierkracht moet zijn.

Opgave 5
Je hijst een kist met stenen met een touw omhoog. De spankracht bedraagt 150 N en verricht bij het hijsen een arbeid van 350 J. Bereken hoe hoog de kist omhoog wordt gehesen.

Opgave 6
Een sleepboot trekt een boot vooruit. De spankracht van het touw is 2,5 kN en verricht een arbeid van 7300 kJ. Bereken de afstand waarover de boot voortgetrokken wordt.

Opgave 7
Een kastenwinkel geeft een brochure uit. In de beschrijving van een stellingkast staat onder andere het volgende. “De planken zijn extra sterk gemaakt. Ze kunnen zeer zware voorwerpen dragen en verrichten dan veel arbeid.” Leg uit dat dit natuurkundig gezien onzin is.

Opgave 8
Kees en Patrick verbouwen een huis. Ze brengen ieder twee zandzakken van de begane grond naar de eerste etage. Kees pakt beide zandzakken vast en loopt de trap slechts één keer op. Patrick loopt de trap twee keer op: iedere keer met één zandzak. Leg uit dat de spierkracht van Kees en Patrick natuurkundig gezien evenveel arbeid verrichten.

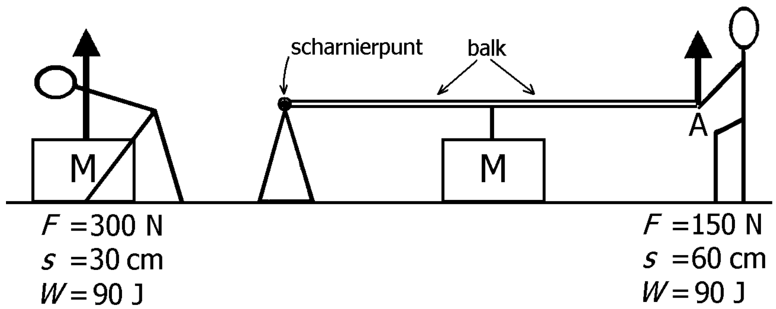
Opgave 9
Kees tilt een steen met een massa van 7,3 kg op en houdt hem boven zijn hoofd. De steen heeft dan een hoogte van 1,85 m boven de grond. Bereken de arbeid die de spierkracht van Kees verricht heeft.

Opgave 10
Jan heeft een massa van 65 kg en loopt in een woontoren via het trappenhuis naar de bovenste verdieping. Zijn spierkracht verricht daarbij een arbeid van 35 kJ (35 kilojoule). Bereken hoeveel meter Jan hierbij gestegen is.

§ 2 Voorbeelden van werktuigen

Hefboom

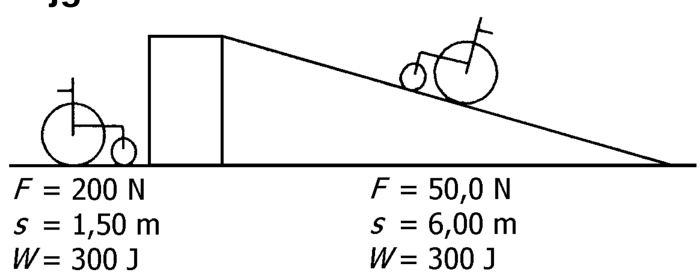
Mark wil een motorblok met een massa van 30,6 kg optillen. Op het motorblok werkt een zwaartekracht van: $F_z = m \cdot g = 30{,}6\ \text{kg} \cdot 9{,}8\ \text{N/kg} = 300\ \text{N}$.
Als Mark het motorblok eigenhandig wil optillen, heeft hij een spierkracht van 300 N nodig. Stel dat hij het motorblok op een laag karretje wil plaatsen en dat hij het motorblok daarvoor 30 cm moet optillen. Zijn spierkracht moet dan een arbeid verrichten van $W = F \cdot s = 300\ \text{N} \cdot 0{,}30\ \text{m} = 90\ \text{J}$. Deze situatie is in de onderstaande linker figuur getekend.



In de rechter figuur maakt Mark gebruik van een hefboom bij het optillen. Hij moet het rechter uiteinde (punt A) 60 cm omhoog trekken. De motor (M) beweegt dan namelijk de gewenste 30 cm omhoog. Het voordeel van de hefboom is dat Mark slechts de halve kracht nodig heeft namelijk 150 N (afgezien van de massa van de hefboom). Marks spierkracht verricht dan een arbeid van:
$W = F \cdot s = 150\ \text{N} \cdot 0{,}60\ \text{m} = 90\ \text{J}$.
Kennelijk verkleint een hefboom wel de benodigde kracht maar niet de te verrichten arbeid. Deze arbeid blijft gelijk (hier 90 J). Dit is een eigenschap die voor alle werktuigen geldt.

Helling om een rolstoel te laten stijgen

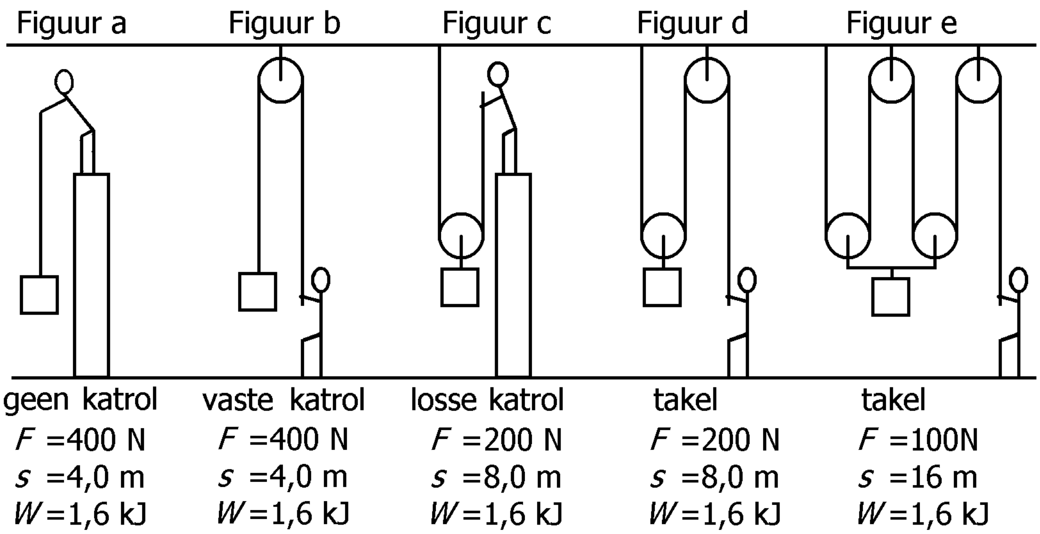
Iris, een verpleegster, wil een lege rolstoel met een massa van 20,4 kg op een 1,50 m hoog plateau zetten. Zij heeft de keuze tussen het optillen van de rolstoel en de rolstoel omhoog rijden via een 6,00 m lange helling. Zie de figuur hiernaast.



Op de rolstoel werkt een zwaartekracht van: $F_z = m \cdot g = 20{,}4\ \text{kg} \cdot 9{,}8\ \text{N/kg} = 200\ \text{N}$.
Als Iris de rolstoel zonder hulpmiddelen optilt, dan moet haar spierkracht dus 200 N bedragen. Bij het omhoog brengen, verricht haar spierkracht een arbeid van
$W = F \cdot s = 200\ \text{N} \cdot 1{,}5\ \text{m} = 300\ \text{J}$.
Als Iris gebruik maakt van de 6,00 m lange helling, dan hoeft haar duwkracht slechts 50,0 N te zijn. De te verrichten arbeid is dan ook 300 J (mits de wielen zo soepel lopen dat wrijving verwaarloosbaar is). Ter controle: $W = F \cdot s = 50{,}0\ \text{N} \cdot 6{,}00\ \text{m} = 300\ \text{J}$.

Katrollen en takels

Jan is zijn huis aan het opruimen. Een kist met boeken moet naar de vliering gebracht worden. Deze kist met boeken heeft een massa van 40,8 kg. Hierop werkt een zwaartekracht van: $F_z = m \cdot g = 40{,}8\,\text{kg} \cdot 9{,}8\,\text{N/kg} = 400\,\text{N}$.
De benodigde kracht om de kist op te tillen of te hijsen, is dus minimaal 400 N.



Om de kist op de vliering te krijgen moet Jan de kist 4,0 m omhoog hijsen. Om dit te bereiken heeft Jan de keuze uit een aantal mogelijkheden. Deze zijn in de bovenstaande figuren getekend.
In figuur a hijst Jan de kist met alleen een touw omhoog. Jan moet dan 4,0 m touw innemen.
In figuur b gebruikt Jan een vaste katrol. Dit heeft het voordeel dat hij het touw omlaag kan trekken in plaats van omhoog. Hij kan dan zijn eigen lichaamsgewicht gebruiken bij het hijsen. De benodigde kracht blijft overigens 400 N en Jan moet nog steeds 4,0 m touw innemen.
In figuur c gebruikt Jan een losse katrol. Omdat de kist nu aan twee touwen hangt heeft hij maar de helft van de oorspronkelijke kracht nodig. Dus 200 N in plaats van 400 N. Als tegenprestatie moet hij wel 8,0 m touw innemen om de kist 4,0 m te laten stijgen.
In figuur d gebruikt Jan een takel met één vaste katrol en één losse katrol. Hij combineert hierbij de voordelen van de vaste katrol met de voordelen van de losse katrol. Hij trekt het touw omlaag met 200 N maar moet wel weer 8,0 m touw innemen.
In figuur e gebruikt Jan een takel met twee vaste katrollen en twee losse katrollen. Hij trekt het touw omlaag met slechts een kwart van de oorspronkelijke kracht (dus 100 N). De kist hangt namelijk aan vier touwen. Het nadeel is wel dat hij 16 m touw moet innemen.

Ga na dat de te verrichten arbeid in alle vijf gevallen gelijk is aan 1,6 kilojoule. Met katrollen en takels kan de vereiste kracht dus wel kleiner worden maar blijft de arbeid onveranderd.

Algemeen

Met een werktuig zoals een hefboom of een takel kan de benodigde kracht verkleind worden. De afgelegde afstand wordt dan automatisch groter. De te leveren arbeid blijft steeds gelijk. In dit verband geldt de zogenaamde gulden regel: “Wat je wint aan kracht, verlies je aan afstand”.

Opgaven bij § 2

Opgave 1
Wat is het voordeel en wat is het nadeel van een hefboom?

Opgave 2
Wat is het voordeel van een vaste katrol?

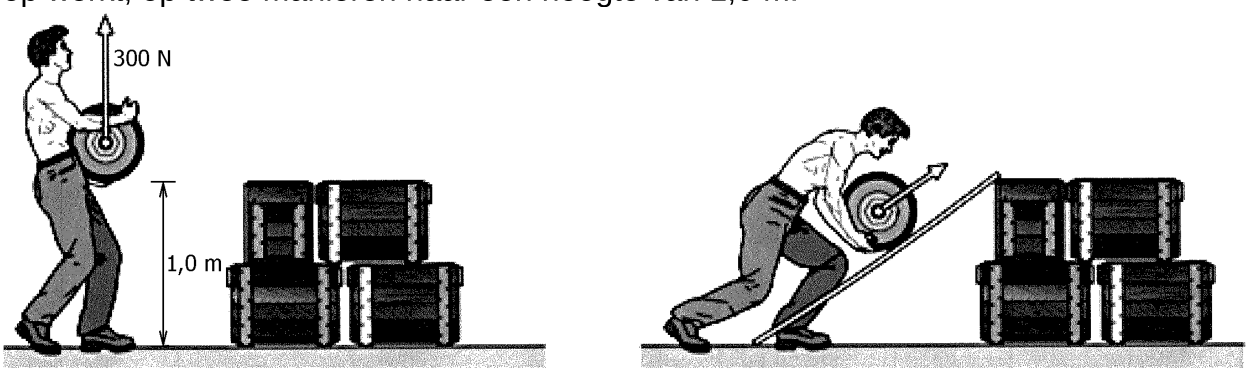
Wat is het voordeel van een losse katrol?

Opgave 3
Wat zijn de voordelen van een takel met één vaste en één losse katrol?

Wat is het nadeel van een takel met één vaste en één losse katrol?

Opgave 4
Een kist heeft een zwaartekracht van 400 N en moet 20 cm omhoog gebracht worden. Door van een hefboom gebruik te maken is de benodigde kracht (op het handvat) slechts 50 N. Bereken de afstand waarover het handvat verplaatst moet worden.

Opgave 5
In de onderstaande figuur brengt een man een vat, waar een zwaartekracht van 300 N op werkt, op twee manieren naar een hoogte van 1,0 m.



Hoe groot is de benodigde spierkracht in het rechter situatie als de lengte van de plank 1,7 m bedraagt?

Opgave 6

a.

Door gebruik te maken van een takel met twee vaste en twee losse katrollen hijst iemand een kast met een massa van 40,8 kg omhoog.

Bereken met welke kracht het touw naar beneden getrokken moet worden.

b.

De kast moet 3,5 m omhoog gehesen worden.

Bereken hoeveel meter touw ingenomen moet worden.

Opgave 7

Teken een takel met in totaal zes katrollen.

Opgave 8

Je fietst een berg op met een vaste snelheid. In de ene versnelling draaien je trappers 15 keer per minuut rond en is je gemiddelde trapkracht 90 N. In de andere versnelling draaien je trappers 45 keer per minuut rond. Bereken de gemiddelde trapkracht in die versnelling.

Opgave 9

Een auto heeft een lekke band. Om de band te vervangen moet de auto aan die kant 50 cm omhoog gebracht worden. Daarvoor is een kracht van 2,8 kN nodig. Hiervoor gebruikt men een krik. De zwengel van de krik heeft een handvat dat bij het opkrikken een cirkelvormige beweging uitvoert. De omtrek van deze cirkel is 90 cm. De gemiddelde spierkracht op het handvat tijdens het opkrikken is 25 N. Bereken hoeveel omwentelingen de zwengel bij het opkrikken minimaal moet maken.

Opgave 10

Een kappersstoel heeft een soort krik om de stoel omhoog te brengen. Als de kapper het pedaal van de krik 15 cm omlaag duwt, gaat de stoel 2 cm omhoog.
Als meneer Tatlises (een Turkse muzikant) op de stoel zit, moet de kapper een kracht van 120 N op het pedaal uitoefenen, om hem te laten stijgen. De stoel zelf heeft een massa van 10 kg.

a.

Bereken de massa van meneer Tatlises.

Emile (75 kg) neemt in de stoel plaats.

b.

Bereken de arbeid die de kapper heeft verricht als hij de stoel met Emile 18 cm omhoog heeft gekrikt.

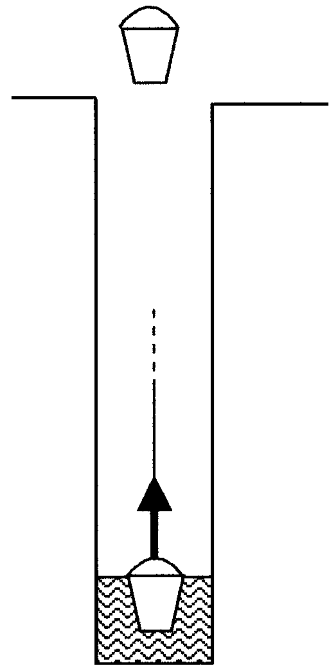
§ 3 Vermogen

Voorbeeld

Marieke bevindt zich in een klein woestijndorp in Afrika. Een diepe waterput voorziet het dorp van water. Een volle emmer heeft een massa van 10,2 kg. Voor het ophijsen hiervan is dus een spankracht van 100 N nodig want

$F_z = m \cdot g = 10{,}2\,\text{kg} \cdot 9{,}8\,\text{N/kg} = 100\,\text{N}$.

De emmer moet in totaal 8,00 m omhoog gehesen worden.
Zie de figuur hiernaast.



De arbeid die Mariekes spierkracht moet verrichten om een volle emmer omhoog te hijsen bedraagt dan:

$W = F \cdot s = 100\,\text{N} \cdot 8{,}00\,\text{m} = 800\,\text{J}$.

Marieke heeft 10 seconde nodig om een volle emmer omhoog te hijsen. Haar spierkracht verricht dan dus per seconde een arbeid van 80 joule. In zo'n situatie gebruiken we in de natuurkunde het woord **vermogen**: Mariekes vermogen bedraagt 80 joule per seconde.

In de natuurkunde wordt de eenheid 'joule per seconde' ook wel **watt** genoemd. Je kan dus ook zeggen dat Mariekes vermogen 80 watt is of kortweg 80 W.

Vermogen

De hier van belang zijnde grootheden en eenheden zijn in de onderstaande tabel opgesomd.

grootheid	Eenheid
arbeid W	joule (afgekort J)
tijdsduur t	seconde (afgekort s)
vermogen P	watt (afgekort W = J/s)

De letter P is afkomstig van het Engelse woord power (= vermogen).
Het vermogen kan worden omschreven als de arbeid die wordt verricht per eenheid van tijd. Anders gezegd: vermogen is het tempo waarin arbeid geleverd wordt. De formule hiervoor is:

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

Deze formule kan in twee andere vormen geschreven worden namelijk:

$$W = P \times t \quad \text{en} \quad t = \frac{W}{P}$$

<u>Opmerking</u>
Verderop in deze cursus wordt de grootheid energie besproken. Ook de energie die per eenheid van tijd wordt omgezet wordt vermogen genoemd.

Opgaven bij § 3

Opgave 1
Schrijf de formule op voor vermogen zoals die in deze paragraaf behandeld wordt.

Opgave 2
Wat is de eenheid van vermogen?

Opgave 3
Stel je duwt een kar vooruit. Je spierkracht verricht een arbeid van 3000 joule in 25,0 seconde. Bereken het (gemiddelde) vermogen dat geleverd wordt.

Opgave 4
Klaas duwt zijn auto gedurende 5,0 s vooruit. Hij levert hierbij een gemiddeld duwvermogen van 700 W. Bereken de arbeid die de spierkracht van Klaas verricht.

Opgave 5
Een hijskraan hijst een auto de lucht in. De geleverde arbeid is hierbij 150 kJ. Het hijsvermogen bedraagt 10 kW. Bereken hoelang de hijskraan hierover doet.

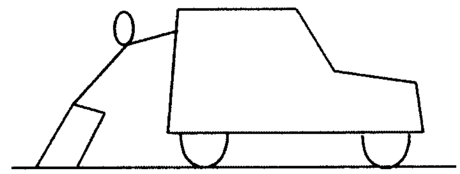
Opgave 6
Met een vaste katrol hijs je een stoel omhoog. De benodigde trekkracht is 150 N. In 8,0 s stijgt de koelkast 3,0 m. Bereken het (gemiddelde) hijsvermogen.

Opgave 7
De Britse natuurkundige James Watt definieerde een andere eenheid voor vermogen: de paardenkracht (pk). De naam paardenkracht is eigenlijk een misleidende naam. Welke naam voor deze eenheid zou veel beter zijn?

Opgave 8
James Watt bepaalde dat een paard, dat een minuut lang trok, een voorwerp met een massa van 115 kg ongeveer 39 m omhoog kon trekken (met behulp van een aantal katrollen). Het geleverde vermogen hierbij noemde hij 1 pk. Bereken nu met hoeveel watt 1 pk overeenkomt.

§ 4 Energie

Voorbeeld



Ali verdient zijn geld door elke week een personenauto van Marokko naar Mali te rijden. Hij moet hierbij steeds de Sahara-woestijn doorkruisen. Tijdens één van zijn tochten gaat de motor kapot. Ali kan de auto niet verlaten omdat de tank met drinkwater aan de auto vast zit. Omdat hij niet al te ver van de eindbestemming af zit, besluit Ali de auto voort te duwen. Zie de figuur. De vereiste (gemiddelde) duwkracht is 400 N.

Ali gaat vol goede moed aan zijn duwtocht beginnen. De eerste 10 km gaan probleemloos. Hij heeft namelijk genoeg "energie" om de hierbij vereiste arbeid van 400 N x 10 km = 4,0 MJ (= 4,0 megajoule = 4,0 miljoen joule) te leveren.
Daarna wordt Ali moe. Toch gaat hij door. Door alle energie die Ali in zijn lichaam heeft te geven duwt hij de auto in totaal 20 km voort. Daarna heeft Ali geen energie meer en .... sterft! De arbeid die gedurende de gehele duwtocht door Ali is geleverd bedraagt: 400 N x 20 km = 8,0 MJ.

We zeggen dat Ali de duwtocht begon met een energie in zijn lichaam van 8,0 MJ en eindigde met een energie van 0 MJ (hij was "leeg"). De energie in Ali's lichaam geeft dus steeds aan hoeveel arbeid hij vanaf dat moment nog kan verrichten.

Opmerking
In dit zeer versimpelde voorbeeld laten we het effect van uitrusten, uitdrogen, de onvolledige omzetting van energie in arbeid enzovoort buiten beschouwing.

Symbool en eenheid van energie

De eenheid van energie is gelijk aan de eenheid van arbeid: joule (J).
Het symbool van de grootheid energie is E.
Bijvoorbeeld geldt voor Ali in het bovenstaande voorbeeld
* aan het begin van de duwtocht: E = 8,0 MJ;
* halverwege de duwtocht: E = 4,0 MJ;
* aan het eind van de duwtocht: E = 0 MJ.

Algemene omschrijving van energie

Als een systeem (zoals een steen, spiraalveer, accu of een mens) energie bezit, wil dit zeggen dat het systeem een kracht kan leveren die arbeid verricht. Korter gezegd: energie bezitten betekent arbeid kunnen verrichten. We kunnen de energie van een systeem als volgt omschrijven.
De energie van een systeem is de MAXIMALE arbeid die dit systeem ONDER IDEALE OMSTANDIGHEDEN kan verrichten.

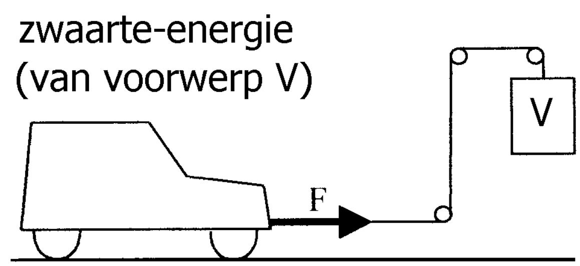
De toevoeging “onder ideale omstandigheden” in de bovenstaande zin is nodig om de volgende reden. Tijdens het verrichten van arbeid ontstaat er vaak warmte ten gevolge van wrijving. Deze warmte is een vorm van energie en komt in de plaats van arbeid. Natuurlijk zou je kunnen proberen om de ontstane warmte ook in arbeid om te zetten. Maar in de praktijk gaat je dat nooit voor 100% lukken. De achterliggende theorie hiervan valt echter buiten de lesstof.

Er zijn verschillende soorten energie te onderscheiden zoals zwaarte-energie, kinetische energie en thermische energie (ook wel warmte genoemd). Steeds hangt de energie van een systeem af van zijn toestand op dat moment. Zo hangt de zwaarte-energie van een steen af van zijn hoogte. De kinetische energie van een rijdende trein hangt af van zijn snelheid. De thermische energie van een gloeiende kogel hangt af van zijn temperatuur. Enzovoort.

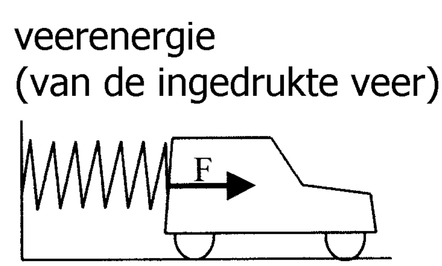
Verschillende vormen van energie

Verschillende energievormen worden hieronder toegelicht. In de voorbeelden wordt steeds een speelgoedkarretje voortgetrokken of voortgeduwd. De kracht waarmee dat gebeurt is in de figuren met F aangegeven. Bij het voorttrekken of voortduwen wordt arbeid verricht. Dat staat hier steeds centraal.

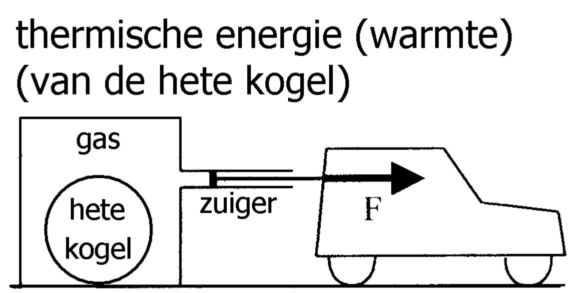
Een voorwerp heeft zwaarte-energie als het zich op een bepaalde hoogte boven de grond bevindt. In de figuur hiernaast zakt voorwerp V naar beneden en trekt het karretje hierbij over een zekere afstand naar rechts (met een koord). Ten overvloede: hierbij wordt arbeid verricht.



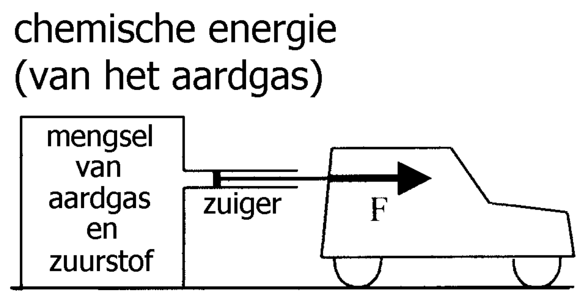
Een spiraalveer heeft veerenergie als deze is ingedrukt of uitgerekt. In de figuur hiernaast duwt een ingedrukte veer het karretje over een zekere afstand naar rechts.



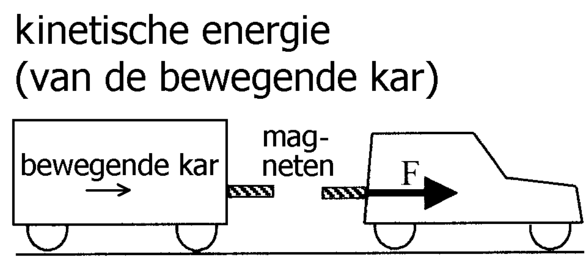
Een voorwerp heeft thermische energie of simpelweg warmte als het warm is. In de figuur hiernaast geeft de hete kogel zijn warmte af aan een gas dat daardoor uitzet en de zuiger en het karretje over een zekere afstand naar rechts duwt.



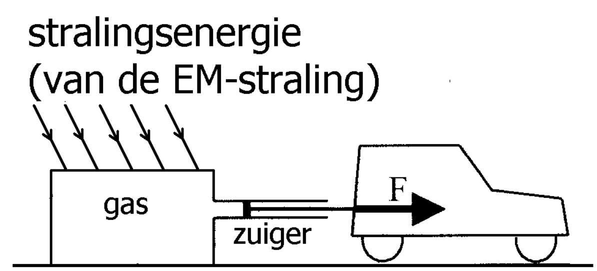
Veel stoffen bezitten chemische energie. In de figuur hiernaast zit een mengsel van aardgas en zuurstof in een reservoir. Bij het verbranden ontstaat er een hoge druk en worden de zuiger en het karretje over een zekere afstand naar rechts geduwd.



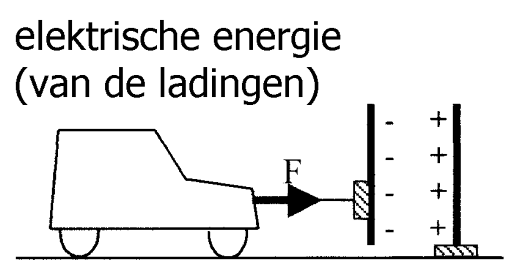
Een voorwerp heeft kinetische energie (of bewegingsenergie) als het snelheid heeft. In de figuur hiernaast rijdt een rechthoekig karretje naar het speelgoedkarretje. Op de karretjes zitten magneten die elkaar afstoten. Het speelgoedkarretje wordt over een zekere afstand naar rechts geduwd.



Elektromagnetische straling zoals zichtbaar licht, infrarood licht of ultraviolet licht bevat stralingsenergie. In de figuur hiernaast valt EM-straling op een zwart oppervlak. Dit oppervlak absorbeert de straling. De hierbij ontstane warmte veroorzaakt het uitzetten van het gas waarbij de zuiger en het karretje over een zekere afstand naar rechts worden geduwd.



Er is sprake van elektrische energie in situaties waarin verplaatsbare elektrische ladingen aanwezig zijn. In de figuur hiernaast is een positief geladen plaat op de grond bevestigd. Een negatief geladen plaat is aan de voorkant van het karretje bevestigd. Omdat beide ladingen elkaar aantrekken, worden de negatieve plaat en het karretje over een zekere afstand naar rechts getrokken.



Bij een batterij waar een lampje op is aangesloten gebeurt iets soortgelijks. De (negatief geladen) elektronen bewegen (buiten de batterij) van de minpool naar de pluspool. Deze elektronen ondervinden daarbij een elektrische kracht die in de bewegingsrichting wijst.

Opgaven bij § 4

Opgave 1
Leg uit waarom de grootheden arbeid en energie dezelfde eenheid hebben.

Opgave 2
Vul een woord in. De energie van een systeem hangt af van zijn ________________.

Opgave 3
Vul op de open plekken van de volgende zinnen de woorden "arbeid" en "energie" in.
De grootheid _________________ is een momentopname van een systeem.
De grootheid _________________ is geen momentopname maar slaat op een traject.

Opgave 4
Een ingedrukte (of uitgerekte) spiraalveer bezit veerenergie. Deze veerenergie wordt bijvoorbeeld in flipperkasten gebruikt om een kogel mee weg te schieten. Tijdens het wegschieten in een bepaald type flipperkast duwt de veer de kogel met een (gemiddelde) kracht van 4,5 N vooruit over een afstand van 6,0 cm. Bereken dan hoeveel veerenergie deze veer in het begin bezat. Neem hierbij aan dat de veerenergie geheel in arbeid is omgezet en niet in andere energievormen.

Opgave 5
Een opgeladen accu bezit chemische energie. Deze chemische energie wordt bijvoorbeeld in elektrische auto's gebruikt om mee vooruit te komen. In een bepaald type elektrische auto kan de motor de auto maximaal 40 km voortduwen met een kracht van 600 N. Bereken dan hoeveel chemische energie deze accu in het begin bezat. Neem hierbij aan dat de chemische energie geheel in arbeid is omgezet en niet in andere energievormen.

Opgave 6
Een ronddraaiend vliegwiel (een soort ronde schijf) bezit kinetische energie. Hoe sneller het vliegwiel ronddraait, des te meer kinetische energie het vliegwiel bezit. Deze kinetische energie wordt bijvoorbeeld in sommige stadsbussen gebruikt om mee op te trekken. In een bepaalde stadsbus bezit het vliegwiel voor het optrekken een kinetische energie van 8000 kJ en na het optrekken 5500 kJ. Bereken dan hoeveel arbeid de motorkracht tijdens het optrekken geleverd heeft. Neem hierbij aan dat de kinetische energie geheel in arbeid is omgezet en niet in andere energievormen.

Opgave 7

Vul de juiste energiesoort in.

Een voorwerp op 3 m hoogte boven de grond heeft: ____________________________

Een rijdende trein heeft: ____________________________

Een ingedrukte spiraalveer heeft: ____________________________

Een uitgerekte spiraalveer heeft: ____________________________

Een hete kogel heeft: ____________________________

De stof dynamiet heeft: ____________________________

Ultraviolette straling heeft: ____________________________

De elektronen bij de minpool van een batterij hebben: ____________________________

Opgave 8

In de bijlage wordt het volgende bewezen.

Voor de zwaarte-energie van een voorwerp met massa m en hoogte h geldt:

$E_Z = m \cdot g \cdot h$.

Hierbij is g de zwaartekrachtversnelling. In Nederland geldt: g = 9,81 N/kg.

Bereken hiermee de zwaarte-energie van een kogel van 0,60 kg op een hoogte van 8,0 m.

Opgave 9

In de bijlage wordt het volgende bewezen.

Voor de kinetische energie van een voorwerp met massa m en snelheid v geldt:

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

Bereken hiermee de kinetische energie van een kogel van 0,30 kg met een snelheid van 5,0 m/s.

Opgave 10

In de bijlage wordt het volgende bewezen.

Voor de veerenergie van een spiraalveer met veerconstante C en uitrekking u geldt:

$E_V = \frac{1}{2} \cdot C \cdot u^2$.

Bereken hiermee de veerenergie van een veer (veerconstante 40 N/m) die 5,0 cm is uitgerekt.

Opgave 11

Een spanningsbron levert gedurende tijdsduur t een spanning U (tussen de polen) en een stroomsterkte I. Voor de elektrische energie die de bron levert geldt:

$E_E = U \cdot I \cdot t$.

Bereken hiermee de geleverde elektrische energie als de bron gedurende 30 s een stroomsterkte van 2,0 A opwekt bij een spanning van 20 V.

§ 5 Wet van behoud van energie

Energieomzettingen; wet van behoud van energie

Energievormen kunnen in elkaar worden omgezet. Energie kan echter nooit verdwijnen. In een situatie waarbij energie wordt omgezet van de ene in de andere vorm (of vormen), zal de totale hoeveelheid energie gelijk blijven. We noemen dit de wet van behoud van energie.

Bij veel energieomzettingen zal naast andere energievormen ook (in meer of mindere mate) warmte ontstaan. Dit is bijvoorbeeld het gevolg van wrijving die een bewegend voorwerp ondervindt. Omgekeerd kan warmte nooit geheel in andere energievormen omgezet worden. Vandaar dat warmte ook wel eens "tweederangs energie" genoemd wordt.

De warmte die vrijkomt bij wrijving is vaak niet merkbaar. Dat komt omdat er in verhouding veel energie (warmte) voor nodig is om stoffen in temperatuur te laten stijgen. Neem als voorbeeld een waterval met een valhoogte van 10 meter. Voordat het water naar beneden is gestort, bezit het water nog zwaarte-energie. Eenmaal beneden is deze zwaarte-energie verdwenen en is er warmte ten gevolge van wrijving in het water voor in de plaats gekomen. Maar is het water dan warmer geworden? Jazeker, alleen is dit niet voelbaar want de temperatuurstijging is slechts 0,023 graden.

In de volgende voorbeelden wordt de wet van behoud van energie toegelicht.

Voorbeeld 1

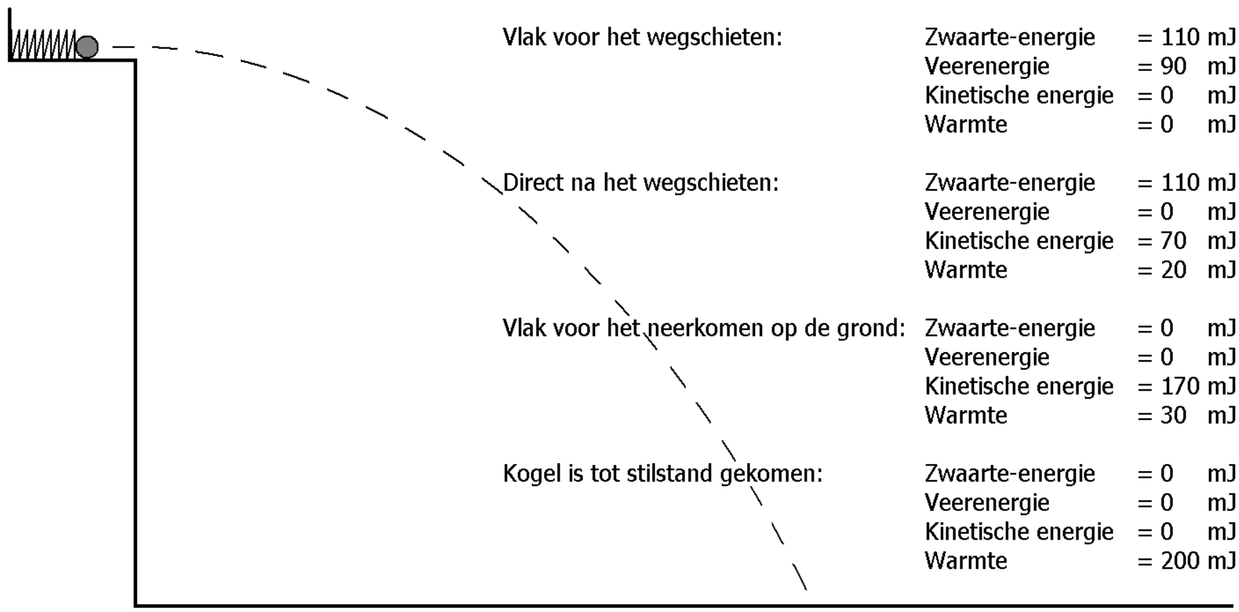
Jan staat in de dakgoot van een huis en laat een steen in een zandbak vallen. In het begin heeft de steen zwaarte-energie. Tijdens het vallen wordt deze zwaarte-energie omgezet in kinetische energie en een klein beetje warmte door de luchtwrijving. Als de steen de zandbak heeft bereikt, wordt hij zeer sterk afgeremd totdat hij stilstaat. De kinetische energie van de steen verdwijnt dan geheel en komt er warmte voor in de plaats.

Stel dat de steen in het begin een zwaarte-energie van 24 J heeft en dat er door de luchtwrijving 4 J aan warmte ontstaat. We krijgen dan het volgende overzicht van de energiewaarden. Merk op dat op elk moment de totale energie gelijk is aan 24 J.

Vlak voor het vallen:	Zwaarte-energie	= 24 J
	Kinetische energie	= 0 J
	Warmte	= 0 J
Vlak voor het neerkomen:	Zwaarte-energie	= 0 J
	Kinetische energie	= 20 J
	Warmte	= 4 J
Nadat de kogel tot stilstand is gekomen:	Zwaarte-energie	= 0 J
	Kinetische energie	= 0 J
	Warmte	= 24 J

Voorbeeld 2

Een kogeltje wordt vanaf een bepaalde hoogte boven de grond weggeschoten door een ingedrukt spiraalveertje. Het kogeltje beweegt door de lucht en komt daarna op de grond terecht, waar het tot stilstand komt. Zie de onderstaande figuur. Tijdens het wegschieten wordt de veerenergie omgezet in kinetische energie van het kogeltje en in een beetje warmte ten gevolge van wrijving. Tijdens het dalen van het kogeltje wordt zijn zwaarte-energie omgezet in extra kinetische energie en in extra warmte ten gevolge van luchtwrijving. Op de grond wordt alle kinetische energie ook nog omgezet in warmte.



Stel dat in de beginsituatie (vlak voor het wegschieten dus) het kogeltje een zwaarte-energie heeft van 110 mJ en het veertje een veerenergie van 90 mJ. Stel verder dat er 20 mJ aan warmte ontstaat tijdens het wegschieten van het kogeltje en 10 mJ aan warmte tijdens het vallen. We krijgen dan het overzicht van de energiewaarden dat naast de situatieschets staat. Ga na dat op elk moment de totale energie gelijk is aan 200 mJ.

Opgaven bij § 5

Vul hieronder de juiste energievormen in op de open plekken.

Opgave 1
Een boek valt van tafel. Tijdens het dalen van het boek (nog voordat het boek de grond raakt) wordt ________________________
omgezet in ________________________
en een klein beetje ________________________.

Opgave 2
Een boek valt van tafel. Als het boek de grond raakt (en tot stilstand komt),
wordt ________________________
omgezet in ________________________.

Opgave 3
Een auto trekt op. Daarbij wordt ________________________
omgezet in ________________________
en in ________________________.

Opgave 4
Een schemerlamp in huis brandt. Daarbij wordt ________________________
omgezet in ________________________
en in ________________________.

Opgave 5
Een bepaalde elektriciteitscentrale gebruikt aardgas als brandstof.
Deze centrale zet __________________
om in ________________________
en in ________________________.

Opgave 6
Een zonnecel zet ________________________
om in ________________________
en in ________________________.

Opgave 7
Iemand sjouwt stenen de berg op om af te slanken.
Daarbij wordt ________________________
omgezet in ________________________
en in ________________________.

Opgave 8

Jan klautert op het dak van een schuur omdat er per ongeluk een tennisbal op is gekomen. Eenmaal op het dak aangekomen pakt hij de bal en loopt naar de rand van het dak. Daar laat hij de tennisbal hoog boven de stoep weer los (zonder de bal een beginsnelheid te geven). Bij het loslaten heeft de tennisbal een zwaarte-energie van 15 J. Net voor het neerkomen op de stoep heeft de tennisbal een kinetische energie van 13 J.
Waar is het verschil van 2 J gebleven?

De volgende dag komt de bal opnieuw op het dak van de schuur terecht. Jan klimt weer op het dak om de bal te halen. Bij de rand van het dak gooit Jan de tennisbal naar beneden. Door dit gooien krijgt de tennisbal een zekere beginsnelheid. Zodoende heeft de tennisbal in het begin een kinetische energie van 8 J. Daarnaast heeft de bal in het begin weer een zwaarte-energie van 15 J. Tijdens het dalen ontstaat er 5 J aan wrijvingswarmte.
Bereken de kinetische energie van de tennisbal vlak voordat deze op de stoep neerkomt.

In de opgaven die hierna komen zijn de volgende formules nodig.

$E_Z = m \cdot g \cdot h$ $\quad\quad$ $E_K = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$ $\quad\quad$ $E_V = \frac{1}{2} \cdot C \cdot u^2$

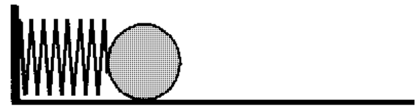
Opgave 9

Een vogel heeft een nest in een boom gebouwd op een hoogte van 7,0 m boven de grond. In het nest ligt een ei met een massa van 0,31 kg.
Bereken de zwaarte-energie van het ei.

Plotseling valt het ei uit het nest. Het ei valt op de grond zonder de onderliggende takken te raken. Tijdens het vallen wordt de zwaarte-energie geheel in kinetische energie van het ei omgezet. De wrijving die het ei in de lucht ondervindt is dus verwaarloosbaar.
Bereken met welke snelheid het ei de grond raakt.

Opgave 10

Een kogel wordt weggeschoten door een ingedrukte spiraalveer. Zie de figuur hiernaast. De spiraalveer heeft een veerconstante van 50 N/m en is in het begin 20 cm ingedrukt.



Bereken hoeveel veerenergie de spiraalveer in het begin bezit.

De massa van de kogel bedraagt 0,20 kg. Tijdens het wegschieten wordt de veerenergie volledig in kinetische energie van de kogel omgezet.
Bereken met welke snelheid de kogel wordt weggeschoten.

Opgave 11

Kees heeft een massa van 65 kg. Hij wil een 100 m hoge toren beklimmen.
Bereken hoeveel zwaarte-energie zijn lichaam dan krijgt.

Een banaan bevat 350 kJ aan chemische energie. Bereken hoeveel bananen Kees moet eten om net zoveel chemische energie binnen te krijgen als de arbeid die Kees bij het klimmen heeft verricht.
Opmerking: in werkelijkheid zal maar een deel van de chemische energie, die je bij het eten binnen krijgt, in arbeid omgezet kunnen worden.

§ 6 Het rendement van apparaten

Vermogen

Bij een energieomzetting verdwijnt de ene energievorm en ontstaat de andere energievorm (of energievormen). De grootheid vermogen geeft aan hoeveel energie er per tijdseenheid (seconde) verdwijnt of ontstaat. Stel dat in tijdsduur *t* een hoeveelheid energie *E* verdwijnt of ontstaat. Voor het vermogen *P* geldt dan de volgende formule.

$$P = \frac{E}{t}$$

In het voorgaande werd het vermogen ook gebruikt om aan te geven hoeveel arbeid er per tijdseenheid (seconde) geleverd wordt. Toen gold voor het vermogen de volgende formule.

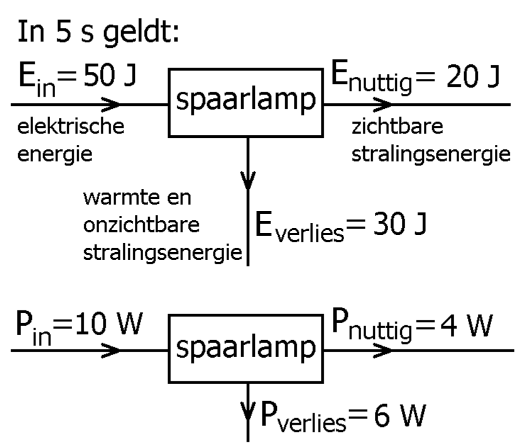
$$P = \frac{W}{t}$$

De grootheden arbeid en energie zijn sterk verwant aan elkaar. Hetzelfde geldt voor de bovenstaande formules. Beide formules kunnen dan ook naast elkaar gebruikt worden.

Voorbeeld: spaarlamp

Een spaarlamp ontvangt elektrische energie uit het stopcontact en zet deze om in stralingsenergie en warmte. Van de stralingsenergie is alleen het zichtbare gedeelte nuttig. Het onzichtbare deel van de stralingsenergie en de warmte kunnen als verlies opgevat worden.

Stel bijvoorbeeld dat een spaarlamp in 5 seconde 50 J aan elektrische energie omzet in 20 J aan zichtbare straling en 30 J aan warmte en onzichtbare stralingsenergie. Je kunt deze waarden dan overzichtelijk weergeven in een energieschema zoals hiernaast is afgebeeld.



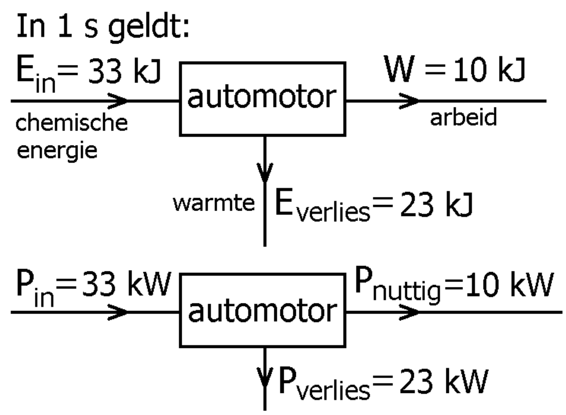
De vermogens kunnen worden uitgerekend door de energiewaarden te delen door de tijdsduur (5 s). Deze vermogens staan in het vermogensschema (onderste schema). Ga dat na.

Het rendement van de spaarlamp bedraagt 40%. Dat wil zeggen dat van de 10 W aan ingaand vermogen 4 W nuttig wordt gebruikt. Trouwens, als we het over het vermogen van een lamp hebben, bedoelen we altijd het ingaande vermogen (hier dus 10 W).

Voorbeeld: automotor

De motor van een auto ontvangt chemische energie uit de brandstof en zet deze om in arbeid en warmte. De arbeid is nuttig want zonder arbeid komt de auto niet vooruit. De ontstane warmte wordt aan de omringende lucht afgegeven en is nutteloos.

Stel bijvoorbeeld dat de motor per seconde 33 kJ (kJ = kilojoule) aan chemische energie verbruikt (dit zit in één kubieke centimeter benzine) en dat de motor een rendement van 30% heeft. De motorkracht levert dan per seconde 10 kJ aan arbeid (30% van 33 kJ) en er ontstaat 23 kJ aan warmte (70% van 33 kJ). Deze waarden kunnen weer overzichtelijk in het energieschema (zie hiernaast) weergegeven worden.



In het vermogensschema (onderste schema) staan de vermogens. Deze kunnen worden berekend door de waarden van de energie te delen door de tijd (hier 1 s). Ga dat weer na. In tegenstelling tot bij een lamp wordt met het vermogen van een automotor altijd het nuttige (dus niet het ingaande) vermogen bedoeld (in ons voorbeeld dus 10 kW).

Samenvatting van het voorgaande

De hiervoor besproken lamp en automotor zijn voorbeelden van apparaten. Veel apparaten zetten energievormen in elkaar om. We kunnen daarbij onderscheid maken tussen ingaande energie, nuttige energie en verloren energie. Bij een motor moet voor de nuttige energie arbeid genomen worden. Het rendement van een apparaat geeft aan welk deel van de ingaande energie in nuttige energie wordt omgezet. Om berekeningen overzichtelijk te laten zijn, maken we gebruik van twee soorten schema's, namelijk het energieschema en het vermogensschema.

Rendement

Het rendement geeft aan welk gedeelte van de ingaande energie nuttig wordt gebruikt. Het symbool voor rendement is de Griekse letter η (spreek uit: èta).

In het bovenstaande getallenvoorbeeld van de lamp is het rendement 40%.
Dit volgt uit het energieschema want:
$\eta = (20\ \text{J} / 50\ \text{J}) \times 100\ \% = 40\ \%$
Het volgt ook uit het vermogensschema want:
$\eta = (4\ \text{W} / 10\ \text{W}) \times 100\ \% = 40\ \%$

Algemeen gelden de volgende formules voor het rendement:

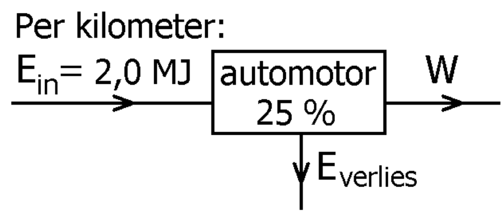
$$\eta = \frac{E_{NUTTIG}}{E_{IN}} \times 100\% \quad \text{en} \quad \eta = \frac{P_{NUTTIG}}{P_{IN}} \times 100\%.$$

Bij een motor moet W in de plaats komen van E_{NUTTIG}.
In de volgende voorbeelden speelt het rendement een belangrijke rol.

Voorbeeld van een opgave

Een automotor heeft een rendement van 25 %. Als de auto één kilometer rijdt, verbruikt de motor een hoeveelheid benzine waarin 2,0 MJ (MJ = megajoule = miljoen joule) aan chemische energie opgeslagen zit.
Bereken de arbeid die de motorkracht daarbij verricht.
Bereken daarna de motorkracht.

Oplossing
Het is overzichtelijk om de gegevens in een energieschema te zetten. Zie de figuur hiernaast. Het rendement (25 %) is een eigenschap van de motor en wordt daarom in de rechthoek geplaatst.



De berekening gaat als volgt.

$$W = E_{NUTTIG} = 0{,}25 \cdot 2{,}0\ \mathrm{MJ} = 0{,}50\ \mathrm{MJ}$$

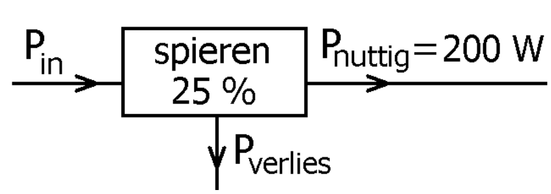
$$F = \frac{W}{s} = \frac{0{,}50\ \mathrm{MJ}}{1000\ \mathrm{m}} = 500\ \mathrm{N} = 0{,}50\ \mathrm{kN}$$

Nog een voorbeeld van een opgave

De volgende tekst dient als inleiding van de opgave.
Onze spieren zijn niet in staat om met een rendement van 100% hun voedingsstoffen om te zetten in arbeid. Wat dat betreft lijken ze op de motor van een auto: een groot deel van de energie komt vrij in de vorm van warmte. Daarom wordt je ook warm tijdens het verrichten van arbeid. Het rendement van onze spieren hangt af van het soort werk dat we doen. Bijvoorbeeld gebeurt gewichtheffen met een lager rendement dan traplopen of fietsen. Voor de laatste twee blijkt het rendement ongeveer 25% te zijn.

En dan nu de opgave.
Een dikke dame wil afvallen en fietst van Voorburg naar Zoetermeer. Zij fietst 1 uur zonder te stoppen en levert hierbij een gemiddeld (nuttig) vermogen van 200 W. Dit gebeurt bij een rendement van 25%. Bereken de benodigde chemische energie die zij hiervoor nodig heeft.

Oplossing
De gegevens zijn hiernaast in het vermogensschema gezet. De berekening gaat als volgt.



$$P_{IN} = \frac{200\ \mathrm{W}}{0{,}25} = 800\ \mathrm{W}$$

$$E_{IN} = P_{IN} \cdot t = 800\ \mathrm{W} \cdot 3600\ \mathrm{s} = 2880000\ \mathrm{J} = 2{,}9\ \mathrm{MJ}$$

Opgaven bij § 6

Vul bij de volgende apparaten de juiste energievormen (of arbeid) in.

<u>Opgave 1</u>
Een gloeilamp zet ____________________________________
om in ____________________________________ (nuttig)
en in ____________________________________ (verlies).

<u>Opgave 2</u>
Een benzinemotor zet ____________________________________
om in ____________________________________ (nuttig)
en in ____________________________________ (verlies).

<u>Opgave 3</u>
Als er zonlicht op een zonnecel valt, kan deze een (elektrische) accu opladen.
Een zonnecel zet ____________________________________
om in ____________________________________ (nuttig)
en in ____________________________________ (verlies).

<u>Opgave 4</u>
Een elektromotor (in bijvoorbeeld een mixer of hijskraan) zet ____________________
om in ____________________________________ (nuttig)
en in ____________________________________ (verlies).

<u>Opgave 5</u>
Een gasgestookte elektriciteitscentrale zet ____________________________________
om in ____________________________________ (nuttig)
en in ____________________________________ (verlies).

<u>Opgave 6</u>
Een menselijke spier zet ____________________________________
om in ____________________________________ (nuttig)
en in ____________________________________ (verlies).

<u>Opgave 7</u>
Een CV-ketel (CV is een afkorting van centrale verwarming) staat in bijna ieder huis en verwarmt het water dat door de radiatoren stroomt. Een CV-ketel werkt op aardgas. De verbrandingsgassen (die vaak nog warm zijn) worden door via de schoorsteen afgevoerd.
Een CV-ketel zet ____________________________________
om in ____________________________________ (nuttig)
en in ____________________________________ (verlies).

Opgave 8

Straalkachels zijn zodanig ontworpen dat ze een bundel warmtestraling (dus infraroodstraling) in een bepaalde richting uitzenden. Straalkachels kunnen zowel buiten als binnen worden gebruikt. Bij tuinfeesten bijvoorbeeld houdt de uitgezonden straling de mensen warm. Zeker 's avonds is dat aangenaam. In badkamers worden straalkachels vlak onder het plafond gemonteerd. De uitgestraalde bundel is dan naar beneden gericht. Sommige straalkachels werken op olie of gas (bij buitengebruik); andere zijn elektrisch. Naast de uitgezonden stralingsenergie verliest elke straalkachel ook warmte die aan de omringende lucht wordt afgegeven.
Leg uit dat het rendement van een straalkachel bij buitengebruik altijd kleiner dan 100% is.

Jan beweert dat het rendement van een straalkachel in een badkamer 100% is.
Geef een argument voor Jans bewering.

Geef een argument tegen Jans bewering.

Opgave 9

Een bromfietsmotor verbruikt 1 liter benzine waarin 33 MJ aan chemische energie opgeslagen zit. De motor levert daarbij 6,6 MJ in de vorm van arbeid. Bereken het rendement van de bromfietsmotor. Advies bij dit soort opgaven: zet de gegevens eerst in een energie- of een vermogensschema.

Opgave 10

Een spaarlamp van 20 W heeft een rendement van 60%. Bereken het nuttige vermogen.

Opgave 11

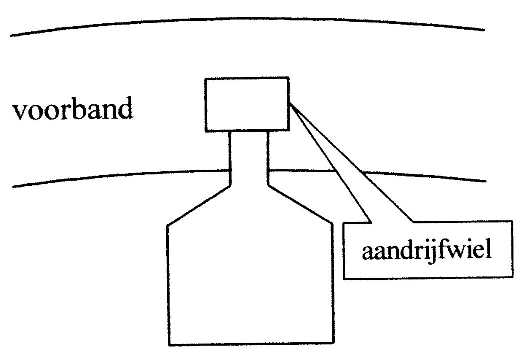
Een stoommachine heeft een rendement van 4,5 %. Bereken dan de arbeid die geleverd kan worden als de stoommachine 10 kg steenkool verbruikt. De chemische energie per kg steenkool bedraagt 29 MJ (MJ = megajoule = miljoen joule).

Opgave 12
Een gloeilamp van 100 W met een rendement van 7,0% geeft evenveel licht (dat wil zeggen: zichtbare stralingsenergie) als een spaarlamp met een rendement van 60%. Bereken het (verbruikte) vermogen van de spaarlamp.

Opgave 13
Een gloeilamp met een rendement van 6,6% zendt gedurende 20 seconde 90 joule aan nuttige (zichtbare) stralingsenergie uit. Bereken het ingaande vermogen.

Opgave 14
Een automotor levert over een afstand van 1,0 km een kracht van 400 N. De motor verbruikt hierbij 49 cm^3 benzine. In elke cm^3 benzine zit 33 kJ aan chemische energie. Bereken het rendement van de motor.

Opgave 15
Bij oudere fietsen wordt de dynamo aangedreven door de voorband. De voorband laat het aandrijfwiel van de dynamo ronddraaien waardoor deze de voor- en achterlamp van elektrische energie kan voorzien. Zie de figuur hiernaast.
Leg uit dat de ingaande energie voor de dynamo arbeid is.



Opgave 16
Ricardo fietst met een constante snelheid door een donker bos. Zijn dynamo (van het ouderwetse type zoals in de vorige opgave beschreven is) voorziet de koplamp van elektrische energie (het achterlicht is kapot). Het aandrijfwiel van de dynamo heeft een omtrek van 7,0 cm. Per omwenteling van het aandrijfwiel ontvangt de koplamp een elektrische energie van 0,028 J.

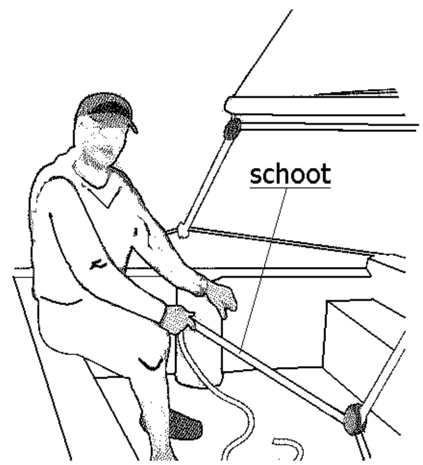
a.
Bereken de kracht waarmee de voorband het aandrijfwiel vooruit duwt als verder nog gegeven is dat het rendement van de dynamo 80 % is.

b.
Bereken het vermogen van de koplamp als het aandrijfwiel 20 keer per seconde ronddraait.

§ 7 Positieve en negatieve arbeid

Positieve en negatieve arbeid

In de figuur hiernaast ben je aan het zeilen. De wind komt van opzij. Het zeil draait niet weg omdat je met een zekere kracht aan de schoot trekt. Je kunt de schoot naar je toe laten komen door harder te trekken en van je af laten gaan door minder hard te trekken.



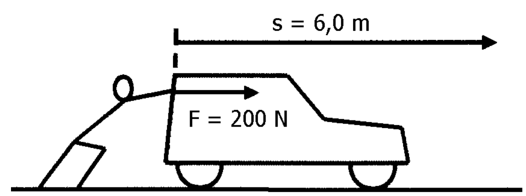
Natuurkundig gezien verricht je trekkracht in beide gevallen arbeid. Er is immers sprake van een (trek)kracht F die over een zekere afstand s werkt. Het verschil zit 'm in het teken van de arbeid. Als je de schoot naar je toe trekt, verricht je trekkracht positieve arbeid. Als je de schoot van je af laat gaan, verricht je trekkracht negatieve arbeid.

In het algemeen geldt het volgende.
De arbeid van kracht F is <u>positief</u> als deze in dezelfde richting wijst als de beweging. Bij een verplaatsing s van het voorwerp geldt dan: **W = + F • s**
De arbeid van kracht F is <u>negatief</u> als deze in tegengestelde richting wijst als de beweging. Bij een verplaatsing s van het voorwerp geldt dan: **W = - F • s**

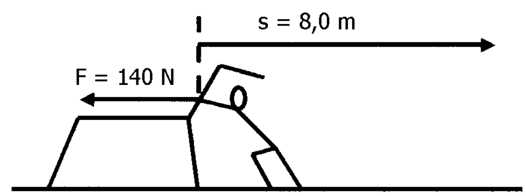
Verderop zullen we zien dat het leveren van positieve arbeid wel een prestatie is en het leveren van negatieve arbeid eigenlijk geen prestatie is. Overigens ging het in de voorgaande paragrafen steeds over positieve arbeid.

Getallenvoorbeelden

Kees duwt een auto met motorpech vooruit. Zie de figuur hiernaast. Over een afstand s van 6,0 m duwt Kees de auto naar voren met een kracht F van 200 N. In dit voorbeeld verricht de spierkracht een positieve arbeid van
$W = +F \cdot s = +200\,\mathrm{N} \cdot 6{,}0\,\mathrm{m} = +1200\,\mathrm{J} = +1{,}2\,\mathrm{kJ}$



Een vluchtend paard wordt tegengewerkt door Jan. Zie de figuur hiernaast. Het paard loopt een afstand s van 8,0 m vooruit terwijl Jan het paard tegenwerkt met een kracht F van 140 N. In dit voorbeeld verricht Jans spierkracht een negatieve arbeid van
$W = -F \cdot s = -140\,\mathrm{N} \cdot 8{,}0\,\mathrm{m} = -1120\,\mathrm{J} = -1{,}1\,\mathrm{kJ}$



Positieve arbeid leveren kost energie

Het verrichten van positieve arbeid ($W > 0$ J) kost 'energie'. Er wordt als het ware een prestatie geleverd. Als je bijvoorbeeld een wasmachine via het trappenhuis (zonder lift) naar de bovenste verdieping van een woontoren sjouwt, word je daar doodmoe van. Je spierkracht wijst in dezelfde richting als de verplaatsing (naar boven) en verricht dus positieve arbeid. Iets minder indrukwekkend is het optrekken met je scooter of brommer. Dit kost brandstof. Daarbij wijst de motorkracht naar voren en levert dus ook positieve arbeid. Neem ten slotte het starten van de motor van je auto. Daarvan raakt de accu leeg. Nu is het de kracht van de startmotor die positieve arbeid levert.

Negatieve arbeid leveren kost geen energie

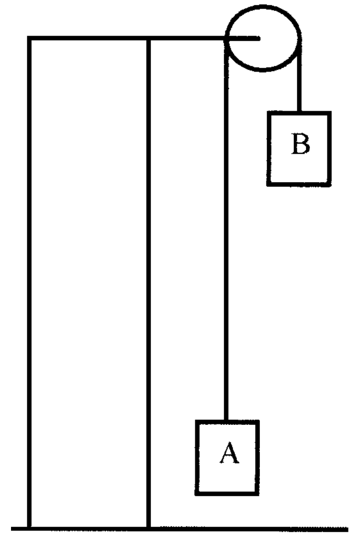
Het verrichten van negatieve arbeid ($W < 0$ J) kost geen energie. Stel bijvoorbeeld dat je een afgedankte wasmachine via het trappenhuis van de eerder genoemde woontoren naar beneden moet brengen. Dan zijn de spierkracht en de verplaatsing tegengesteld gericht en levert de spierkracht dus negatieve arbeid. Uit ervaring weten we dat het naar beneden sjouwen van een wasmachine veel gemakkelijker gaat dan het naar boven sjouwen. Je wordt er lang niet zo moe van. Maar je zou het je nog makkelijker kunnen maken door de wasmachine over de traptreden naar beneden te laten glijden (de machine is toch oud). Dan verricht de wrijvingskracht negatieve arbeid in plaats van je spierkracht. Laten we ook even naar de eerder genoemde scooter of brommer kijken. In tegenstelling tot het optrekken kost het afremmen geen brandstof. De remkracht (wrijvingskracht) wijst naar achteren en levert dus ook negatieve arbeid. Als laatste voorbeeld nemen we het tegenwerken van het vluchtende paard (zie hiervoor). Als je dit niet eigenhandig doet, maar op een slimme manier, hoeft dat ook geen inspanning te kosten. Bijvoorbeeld: je kunt een touw om de nek van het paard binden en het andere touweinde aan een grote steen vastknopen. Als het paard de grote steen moet voorttrekken, wordt hij immers ook tegengewerkt. Opnieuw laat je dan de wrijvingskracht het werk doen.

Negatieve arbeid leveren kan voordeel geven

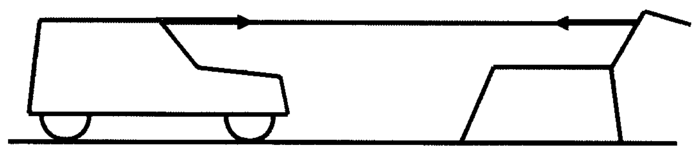
In het voorgaande zagen we dat het verrichten van negatieve arbeid geen energie kost; zeker niet als je gebruik maakt van wrijving. Ten gevolge van deze wrijving ontstaat er warmte. Als je de wasmachine bijvoorbeeld op de treden van de trap naar beneden laat glijden, worden de wasmachine en de trap een beetje warmer. Bij de remmende scooter of brommer worden de remblokjes warm en bij het paard dat de grote steen voorttrekt worden de steen en de grond wat warmer.

Je zou kunnen beweren dat het zonde is dat je de bovengenoemde wrijvingswarmte niet gebruikt. Inderdaad kun je er voor zorgen dat het verrichten van negatieve arbeid voordeel voor je oplevert. Met name is dat het geval als je een tweede klus hebt waarbij je positieve arbeid moet verrichten. Zie de twee volgende voorbeelden.

Stel dat je een afgedankte wasmachine in de eerder genoemde woontoren moet afvoeren en tegelijkertijd een nieuwe wasmachine naar boven moet brengen. Dan kun je deze werkzaamheden eenvoudig combineren door beide wasmachines via een katrol met elkaar te verbinden. Zie de figuur hiernaast. Bij het dalen van de oude wasmachine (A) wordt de nieuwe wasmachine (B) vanzelf omhoog getrokken. Dit bespaart je zelf energie om de nieuwe wasmachine omhoog te tillen.



Neem ook het tegenwerken van het vluchtende paard. Je kunt dit combineren met het vooruit helpen van de kapotte auto. Zie de figuur hiernaast. Dat bespaart je energie om de auto zelf vooruit te duwen.



Gelet op het bovenstaande is de term ‘negatieve arbeid’ logisch. In plaats van dat je iets waardevols (energie) geeft of levert, krijg je iets waardevols (tenminste als je het slim aanpakt). Je kunt ‘negatieve arbeid’ met ‘negatieve uitgave’ vergelijken. Hierbij geef je geen geld maar krijg je geld.

Opgaven bij § 7

Opgave 1
Je duwt een auto vooruit. Verricht je spierkracht positieve of negatieve arbeid?

Opgave 2
Een geparkeerde auto staat in zijn “vrij” en niet op de handrem. Doordat de auto op een helling staat komt hij in beweging. De eigenaar van de auto probeert deze af te remmen. Levert de spierkracht van de eigenaar positieve of negatieve arbeid?

Opgave 3
Wat is vermoeiender: positieve of negatieve spierarbeid verrichten?

Opgave 4
Een rijdende fietser wordt afgeremd door de wrijvingskracht. Verricht de wrijvingskracht dan positieve of negatieve arbeid?

Opgave 5
Een balpen valt van tafel. Verricht de zwaartekracht op de pen positieve of negatieve arbeid tijdens het vallen?

Opgave 6
Een bergbeklimmer klimt tegen de muur van een wolkenkrabber omhoog. Verricht de zwaartekracht op de klimmer positieve of negatieve arbeid?

Opgave 7
Een bergbeklimmer klimt tegen de muur van een wolkenkrabber omhoog. Verricht zijn spierkracht positieve of negatieve arbeid?

Opgave 8
Een spiraalveer is in ongespannen toestand 15 cm. Kees duwt de veer in zodat zijn nieuwe lengte 12 cm wordt. Verricht de spierkracht van Kees positieve of negatieve arbeid?

Opgave 9
Een spiraalveer is in uitgerekte toestand 17 cm. Kees laat de veer met zijn handen langzaam teruggaan naar de ongespannen toestand (met een lengte 15 cm). Verricht de spierkracht van Kees positieve of negatieve arbeid?

Opgave 10
Een spiraalveer is in uitgerekte toestand 17 cm. Kees rekt de veer met zijn handen verder uit zodat zijn nieuwe lengte 20 cm wordt. Verricht de spierkracht van Kees positieve of negatieve arbeid?

Opgave 11

Kees duwt zijn kapotte auto (massa: 1000 kg) over een afstand van 20 m vooruit over een horizontale weg. De duwkracht van Kees bedraagt 150 N.

a.

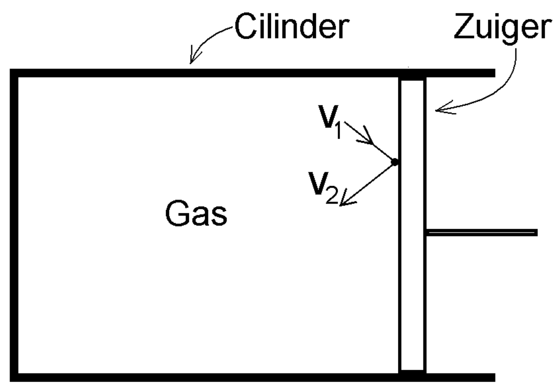
Bereken de arbeid die de spierkracht van Kees hierbij verricht.

b.

De wrijvingskracht op de auto is 150 N (dus even groot als de duwkracht). Bereken de arbeid die de wrijvingskracht hierbij verricht.

Opgave 12

In de figuur hiernaast bevindt een afgesloten hoeveelheid gas zich in een cilinder. De zuiger is verschuifbaar in de cilinder. In deze opgave proberen we het volgende verschijnsel te begrijpen. Als de zuiger naar rechts beweegt, daalt de temperatuur van het gas. Omgekeerd stijgt de gastemperatuur als de zuiger naar links beweegt. De beweging van de zuiger moet hierbij snel zijn om de warmte-uitwisseling tussen het gas en de cilinder klein te houden. In deze opgave kijken we alleen naar het naar rechts bewegen van de zuiger. Het omgekeerde geval (zuiger gaat naar links) gaat analoog.



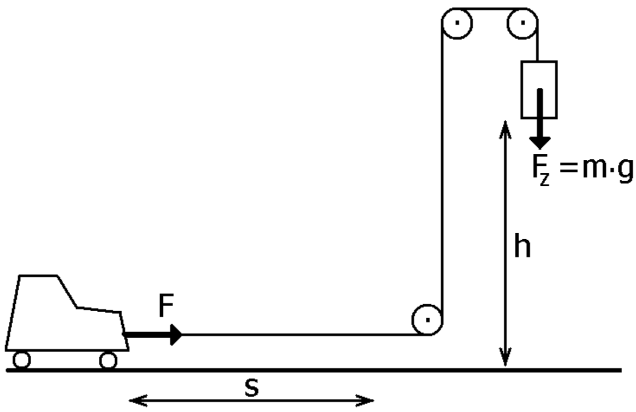
Vul op de onderstaande open plekken één van de volgende woorden in: positieve, negatieve, toe, af, groter of kleiner.

Als de zuiger naar rechts beweegt,
verricht de kracht van het gas op de zuiger ______________________ arbeid.
De energie van
het gas neemt dan dus __________.
Als we aannemen dat de energie van het gas alleen
uit de kinetische energie van gasmoleculen bestaat, moet
de gemiddelde snelheid van de moleculen in het gas dus _____________ worden.
Dit laatste kunnen we begrijpen als we naar afzonderlijke botsingen van moleculen tegen de zuiger kijken. In de figuur is een botsend molecuul getekend.
Als de zuiger naar rechts beweegt, is de
snelheid van dit molecuul na de botsing (v_2) ________________________
dan de snelheid van dit molecuul voor de botsing (v_1).

Bijlage: zwaarte-energie, veerenergie, kinetische energie

<u>Formule voor de zwaarte-energie</u>

In de figuur hiernaast hangt een blokje aan een touw. Het blokje daalt met een constante snelheid totdat het op de grond komt. Tijdens het dalen trekt het een karretje vooruit. Als de drie katrollen wrijvingsloos draaien, dan is de trekkracht F op het karretje even groot als de zwaartekracht op het blokje. Bovendien is de afstand s waarover F werkt even groot als de daalafstand h van het blokje.



Dus geldt voor de verrichte arbeid van F:

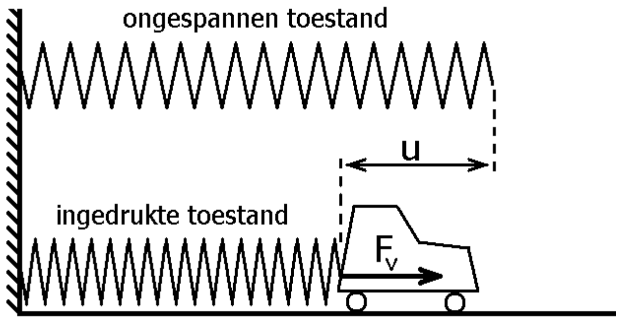
$W = F \cdot s = F_Z \cdot h = m \cdot g \cdot h$

Dus geldt ook voor de zwaarte-energie van het blokje:

$E_Z = m \cdot g \cdot h$.

<u>Formule voor de veerenergie</u>

In de figuur hiernaast duwt een ingedrukte spiraalveer een karretje vooruit. Het duwen stopt pas als de veer zijn ongespannen toestand heeft bereikt. De veerkracht F_V op het karretje verricht arbeid tijdens het duwen. Hieronder leiden we een formule voor deze arbeid af.



Stel dat de veer oorspronkelijk over een afstand u is ingedrukt. Dan wordt het karretje dus over afstand u vooruit geduwd. De veerkracht wordt echter steeds kleiner tijdens het langer worden van de veer. In het begin geldt: $F_V = C \cdot u$. Hierbij is C de zogenaamde veerconstante. Aan het eind (als de veer ongespannen is) geldt: $F_V = 0$. De gemiddelde veerkracht $F_{V,GEM}$ tijdens de verlenging van de veer is dan: $F_{V,GEM} = ½ \cdot C \cdot u$.

Dus geldt voor de verrichte arbeid van de veerkracht:

$W = F_{V,GEM} \cdot u = ½ \cdot C \cdot u \cdot u = ½ \cdot C \cdot u^2$

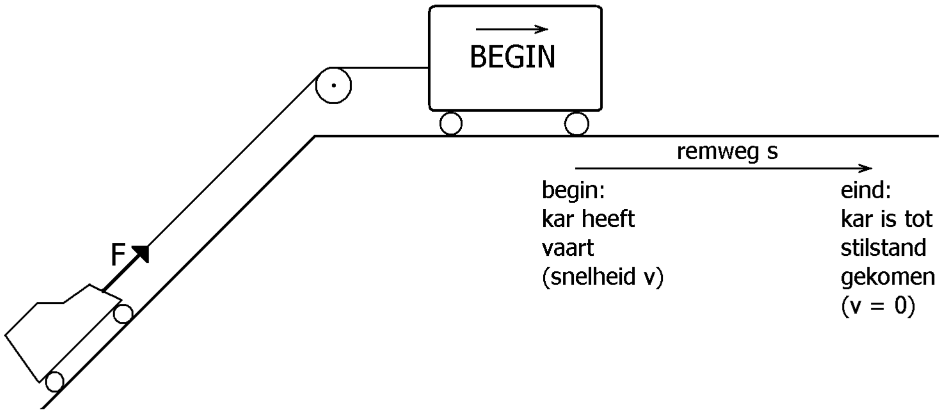
Dus geldt ook voor de veerenergie:

$E_V = ½ \cdot C \cdot u^2$

Deze formule geldt zowel voor ingedrukte als uitgerekte veren. De letter u stelt in het ene geval de “indrukking” voor; in het andere geval de “uitrekking”.

Formule voor de kinetische energie

In de figuur hiernaast rijdt een vierkante kar naar rechts. Door zijn vaart is deze in staat om een karretje omhoog te trekken op een steile helling. De trekkracht F op het karretje verricht daarbij arbeid. Pas als de vierkante kar stil staat, kan geen arbeid meer geleverd worden.



Als s de remweg van de vierkante kar is, dan geldt voor de arbeid: $W = F \cdot s$.
We kunnen deze formule herleiden tot $W = ½ \cdot m \cdot v^2$. Hierbij zijn m en v de massa en de beginsnelheid van de vierkante kar. Dit gaat als volgt.

De tweede wet van Newton luidt: $F = m \cdot a$. Hierbij geldt voor de versnelling: $a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$.
Nu gaan we de tweede wet van Newton op de vierkante kar toepassen. Als t de remtijd van de kar is en we geen rekening houden met mintekens, dan krijgen we:

$$F = m \cdot \frac{v}{t}$$

Tijdens het afremmen is de gemiddelde snelheid v_{gem} de helft van de beginsnelheid v. Het remmen gebeurt namelijk eenparig en de eindsnelheid is 0. Daarom geldt voor de afgelegde afstand:

$$s = v_{gem} \cdot t = ½ \cdot v \cdot t$$

Dus geldt voor de arbeid:

$$W = F \cdot s = m \cdot \frac{v}{t} \cdot ½ \cdot v \cdot t = ½ \cdot m \cdot v^2$$

Dus geldt ook voor de kinetische energie van de vierkante kar:

$$E_K = ½ \cdot m \cdot v^2$$