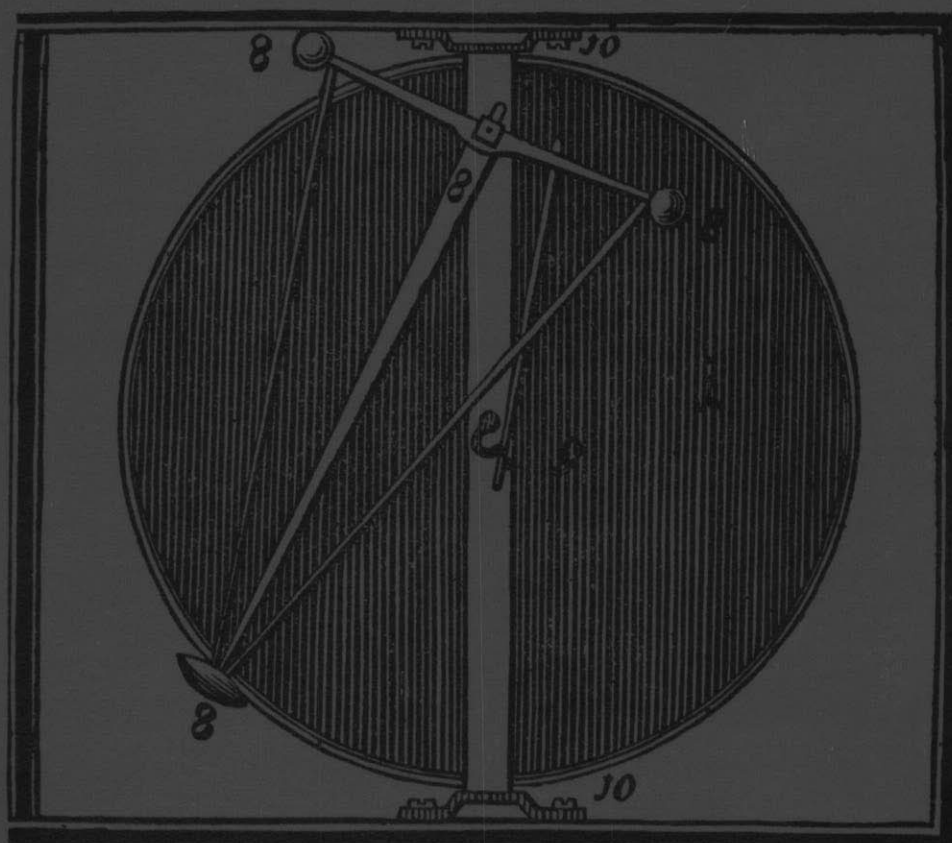




machines en energie



PROJECT LEERPAKKETONTWIKKELING NATUURKUNDE

- * Het Project Leerpakket Ontwikkeling Natuurkunde (PLON) is in 1972 begonnen onder auspiciën van de Commissie Modernisering Leerplan Natuurkunde (CMLN). De opdracht was: het ontwikkelen en door middel van onderzoek evalueren van leerpakketten voor natuurkundeonderwijs op mavo, havo en vwo, en het ontwerpen van een plan voor goede begeleide introductie daarvan in de scholen.
- * Het PLON werkt onder toezicht van een stuurgroep waarin vertegenwoordigers uit het onderwijs, de vervolgopleiding, didactische instellingen, onderwijsondersteuningsinstituten, lerarenopleidingen en het Ministerie van Onderwijs en Wetenschappen vertegenwoordigd zijn.
- * Het PLON is ondergebracht bij de Vakgroep Natuurkunde Didaktiek van de Rijksuniversiteit Utrecht. Deze vakgroep participeert tevens in de activiteiten ten behoeve van havo-bovenbouw. Ten behoeve van vwo-bovenbouw bestaat een samenwerkingsverband met de universiteiten van Amsterdam (GU) en Groningen, en groepen leraren die werken aan de ontwikkeling van lesmateriaal.
- * Het adres van het PLON is:
PLON, lab. Vaste Stof, Postbus 80.008, 3508 TA, de Uithof, Utrecht
Tel. 030-532717

© 1981 Rijksuniversiteit Utrecht Project Leerpakket Ontwikkeling Natuurkunde/BV Uitgeverij N I B Zeist

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotocopie, microfilm of op welke andere wijze ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

No part of this book may be reproduced in any form by print, photoprint, microfilm or any other means without the prior permission of the publisher.

Experimentele uitgave

machines en energie

machines en energie

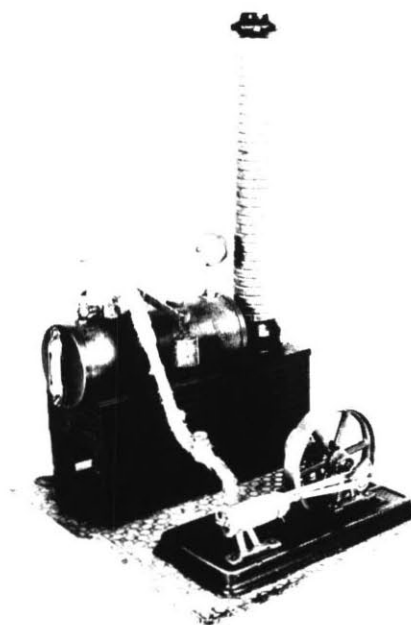
Samengesteld door de projectgroep van het PLON

voor de 4e klas mavo en
voor de 3e klas havo-vwo

Experimentele versie



BV Uitgeverij **nib**



OVER DIT BOEK

Het thema *Machines en energie* dat nu voor je ligt, bestaat uit vier onderdelen. Het eerste deel, de **inleiding**, haalt de kennis over energie die je in andere thema's hebt opgedaan, weer naar boven.

Het tweede deel, het **basisdeel**, zet allerlei zaken rond energie, arbeid, energie-omzettingen, rendement en vermogen — zaken die je voor een deel ook al in andere thema's bent tegengekomen — nog eens goed op een rijtje. In dat deel vind je afwisselend proeven en theorie, met aan het slot opdrachten om te oefenen.

In deel drie vind je een aantal **keuzeonderzoeken** over rendementsmeting bij machines onder verschillende omstandigheden. Ook vind je er een tweetal onderzoeken over het 'verdwijnen' van energie in de vorm van warmte.

De **leesteksten** vind je in deel 4. Deze leesteksten gaan wat dieper in op energieomzettingen en op de rol die arbeid en warmte daarbij spelen.

Bij het begin van ieder deel vind je een inhoudsopgave.

Inhoud	Inleiding	blz. 5
	Basisdeel	blz. 13
	Keuzeonderzoeken	blz. 39
	Leesteksten	blz. 55

Veel leer-, onderzoek- en leesplezier!

Dit thema gaat over *machines* en *energie*.
We gaan eerst even deze twee woorden bekijken.

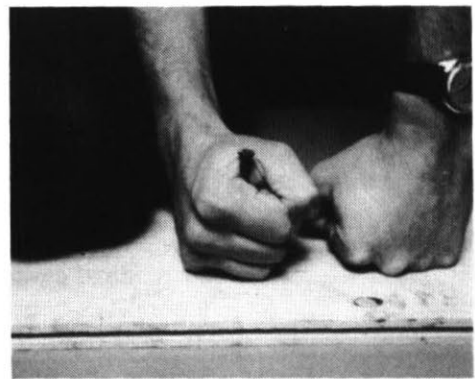
MACHINES

Het woord 'machine' wordt vaak gebruikt voor allerlei werktuigen die werk voor ons kunnen doen. Vaak moet je zelf nog wel wat moeite doen om dat werk te laten gebeuren.

Bekijk de volgende foto's en tekeningen maar eens.

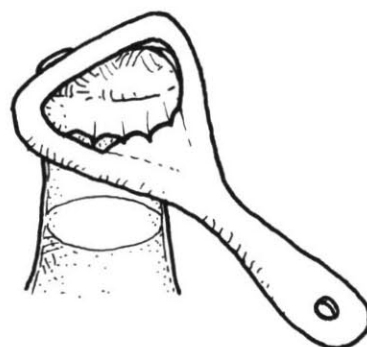


Met een nijptang trek je vrij gemakkelijk een spijker uit een stuk hout

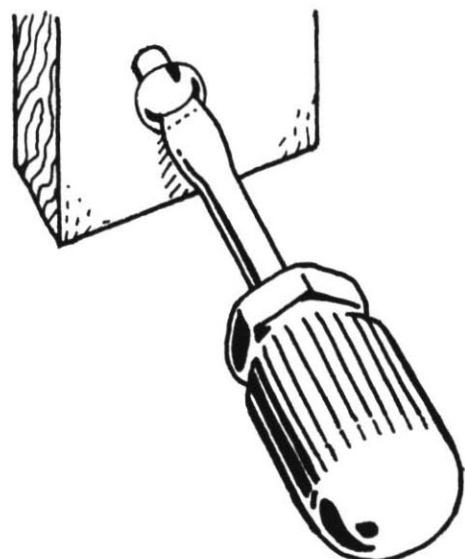


Als je geen nijptang hebt, krijg je dat meestal niet voor elkaar

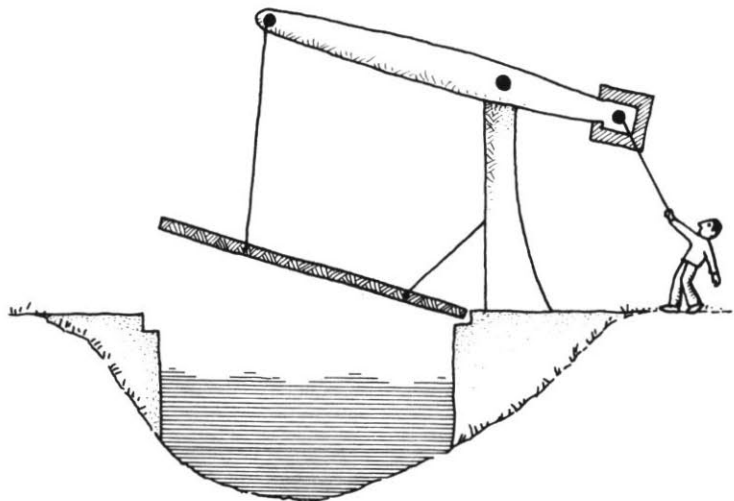
Andere voorbeelden van werktuigen die het werk makkelijker voor je maken:



Een flesseopener



Een schroevendraaier



Ook bij het openen van een (ophaal)brug heb je te maken met een werktuig dat het werk makkelijker voor je maakt: de ophaalhefboom met het contra-gewicht.

In al deze gevallen wordt je eigen inspanning *omgezet* in een vorm die beter geschikt is voor het werk dat gedaan moet worden. Vaak is dat een omzetting in werk met een grotere kracht of een grotere snelheid. We komen hierop terug in het basisdeel.

Er zijn ook machines die het werk helemaal van je overnemen:

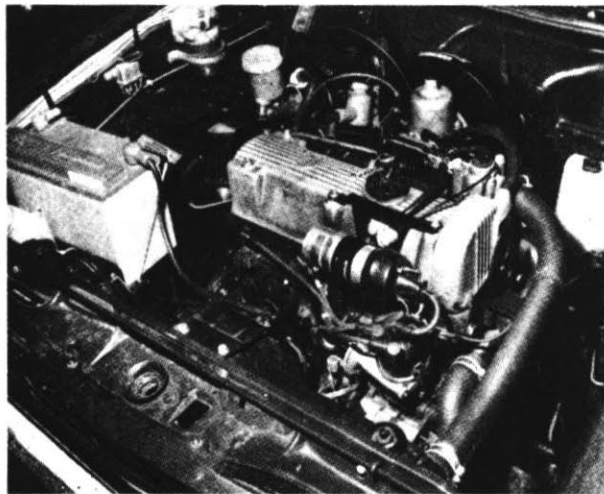


Als je fietst, moet je zelf trappen om vooruit te komen



Bij een brommer doet de motor het werk voor je

Bij machines die het werk van je overnemen, denk je misschien het eerst aan benzinemotoren, elektromotoren, stoommachines, enz.



Een automotor



Een trein met een stoommachine als motor

Maar ook water- en windmolens zijn machines die werk voor je kunnen doen.



Een watermolen



Een windmolen

Die machines doen dat werk niet zomaar. Je moet er *energie* instoppen om ze te laten werken.

ENERGIE

Met 'energie' heb je in andere thema's al verschillende keren te maken gehad. In *IJs, water, stoom* bijvoorbeeld, bij het smelten en verdampen van stoffen.

4. WARMTE TOEVOER, WARMTE DIE VRIJKOMT

Je hebt gezien dat voor smelten en verdampen warmte-energie nodig was. Die warmte-energie wordt gebruikt om de moleculen los van elkaar te maken.

Proef 14

Doe wat ether of alcohol of eau de cologne op je hand. Wat voel je even later? Wat zie je?

Hoe komt de vloeistof aan z'n warmte-energie die nodig is om te verdampen?

Bij condenseren of stollen gaat het net andersom. De moleculen hebben dan net zo'n grote snelheid dat ze elkaar weer aan zullen trekken en er ontstaat water resp. ijs. Bij het dicht op elkaar komen van de moleculen komt warmte-energie vrij.

In *Energie thuis* werden allerlei energiebronnen bekeken. En er kon met *energie* gerekend worden:

Opdracht 1. Kosten berekenen uit het vermogen

Je gaat nu berekenen hoeveel elektrische energie een apparaat gebruikt, zonder hulp van de kWh-meter. Daarvoor moet je het vermogen van het apparaat weten.

Je hebt al gemerkt dat de lamp en de straalkachel in 5 minuten niet evenveel energie opnemen. De straalkachel was veel gulziger dan de lamp.

Als we het energiegebruik van twee apparaten vergelijken, vergelijken we meestal het energiegebruik per seconde. Het vermogen van een apparaat geeft aan wat het energiegebruik is in één seconde. Het vermogen van een straalkachel is dus groter dan het vermogen van een lamp. Het vermogen druk je uit in watt (W) en soms in kW (1 kW = 1000 W).

Als je nu weet hoe lang een apparaat elektrische energie gebruikt, dan kun je met het vermogen de hoeveelheid gebruikte energie berekenen:

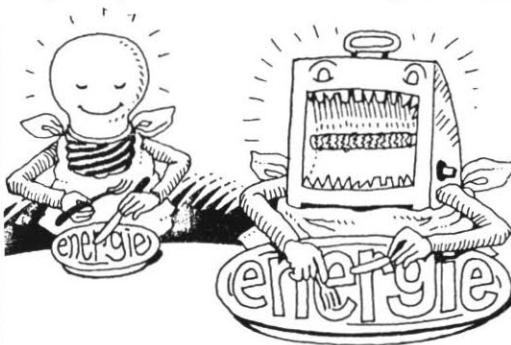
Een broodrooster van 1000 W die 1 uur aanstaat (60 boterhammen) gebruikt 1000 Wh = 1 kWh elektrische energie.

Een radio van 80 W die 5 uur aanstaat, gebruikt $80 \times 5 = 400$ Wh = 0,4 kWh elektrische energie.

Een straalkachel van 2000 W die 3 uur aanstaat gebruikt 6 kWh elektrische energie.

Een digitale klok van 3 W verbruikt per etmaal 0,072 kWh elektrische energie.

Een gloeilamp van 100 W die 1½ uur brandt gebruikt 0,15 kWh elektrische energie.



1. Zoek het vermogen op van de lamp en de straalkachel van proef 2.
2. Bereken uit het vermogen hoeveel elektrische energie de lamp en de kachel in 1 uur gebruiken.
3. Vergelijk de waarden die je vindt met je resultaten bij proef 2, onderdeel 2.

Proef 3. Hoe duur is verwarmen?

1. Breng 1 liter water aan de kook met een dampelaar of met een elektrisch kookplaatje. Meet het energiegebruik. Bereken de kosten. De prijs van 1 kWh vind je op de binnenkafte voorin. Vul de resultaten in in de tabel.



Water aan de kook brengen met een elektrisch kookplaatje (links) en een dampelaar (rechts).

OM 1,0 L WATER AAN DE KOOK TE BRENGEN, IS NODIG:

AARDGAS	BUTAGAS	ELECTRICITEIT
..... M ³	 GRAM	 kWh
f	f	f

En je leerde in *Energie thuis* dat de eenheid van energie de Joule (afgekort: J) is:

OM 1,0L WATER AAN DE KOOK TE BRENGEN, IS NODIG:		
AARDGAS	BUTAGAS	ELECTRICITEIT
..... M^3	 GRAM	 kWh
f	f	f
..... J	 J	 J (BIJ DE CENTRALE)

1 kWh ELECTRICITEIT LEVERT	3.600.000 J
1 M^3 AARDGAS LEVERT	30.000.000 J
1 GRAM BUTAGAS LEVERT	55.600 J

In hetzelfde thema heb je ook gewerkt met het *vermogen* van elektrische apparaten.

Proef 4. Voorspellen of een stop doorslaat.

Aan de kleur van de verklipper op een zekering kun je zien hoe groot de stroom is die je maximaal door de stop kunt sturen. Bij een zekering met een rode verklipper is dit 10A, bij een zekering met een grijze verklipper 16A. Op lampen en apparaten staat echter niet aangegeven hoe groot de stroom is die er gaat lopen als je het apparaat aansluit. Wel vind je erop aangegeven hoeveel energie er per seconde gebruikt wordt als het apparaat aanstaat. Het energiegebruik van een lamp of apparaat per seconde heet het vermogen. Van lampen is het vermogen bijvoorbeeld 40W of 100 W. Een straalkachel heeft een vermogen van bijvoorbeeld 2000 W.

Er bestaat een verband tussen het vermogen van een apparaat en de stroom die er gaat lopen als je het apparaat aansluit op de vereiste spanning (bij het elektriciteitsnet is dat 220 V):

MIXER TYPE 9900	STOFZUIGER
220 V 100 W	SPANNING 220V/600 W
	MODEL 4344

VAATWASMACHINE Type 96
Voltage: 220 V 50 Hz 15 A
Verwarming: 2 kW.
Pomp: 500 W.

VERMOGEN = SPANNING $\times$ STROOM

In het thema *Verwarmen en isoleren* had je ook te maken met 'energie' en 'Joule'. Bovendien heb je in dat thema metingen uitgevoerd om het *rendement* van onder andere een c.v.-installatie te bepalen: je moet meer energie in de ketel stoppen dan er aan 'nuttig te gebruiken' warmte uit de radiatoren komt.

Tenslotte heb je in een bijlage van het thema *Verkeer en veiligheid* kennis kunnen maken met *arbeid* en *bewegingsenergie*.

Dit fietsen, het steeds leveren van een kracht, kost arbeid, lichamelijk werk, waar je moe van wordt en waar je honger van krijgt. In de natuurkunde kennen we ook het begrip arbeid. Het betekent daar iets anders dan moe worden of honger krijgen.

In de natuurkunde noemen we *arbeid*:

arbeid is het produkt van kracht en weg = $F \times s$

Een fietser die een kracht van 100 N uitoefent over een traject van 5000 meter, heeft een arbeid geleverd van:

$$\begin{aligned}\text{arbeid} &= \text{kracht} \times \text{weg} \\ &= F \times s \\ &= 100 \text{ N} \times 5000 \text{ meter} \\ &= 500.000 \text{ newton-meter} \\ &= 500.000 \text{ joule}\end{aligned}$$

Fietsen kost arbeid. Meestal lever je die arbeid zelf door te trappen. Op het moment dat jij ophoudt met trappen, rijdt de fiets toch nog een stukje door. De fiets verricht gedurende dit stukje arbeid, immers hij moet de wrijvingskrachten overwinnen.

In de natuurkunde zeg je dat de fiets (en de fietser natuurlijk) door hun snelheid arbeid kunnen verrichten en *dus* energie bezitten.

Een fietser die hard rijdt, bezit veel energie, want hij kan veel arbeid verrichten. Het duurt veel langer voordat een hard rijdende fiets stilstaat.

Dus: „iets” heeft energie als het arbeid kan verrichten

De energie die de fiets en fietser hebben, noemen we *bewegingsenergie* of *kinetische energie*. Deze bewegingsenergie kan in een formule uitgedrukt worden en wel

$$\text{bewegingsenergie} = \frac{1}{2}mv^2$$

Een fietser (80 kg) die met een snelheid van 18 km/h (5 m/s) fietst bezit dus een energie van $\frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2} \cdot 80 \text{ kg} \cdot (5 \text{ m/s})^2 = 1000 \text{ joule}$.

De bedoeling van dit thema *Machines en Energie* is:

- om alles over energie nog eens goed op een rijtje te zetten
- om te laten zien hoe machines energie kunnen omzetten

inhoud

1	Arbeid	blz. 15
2	Verlies van arbeid	blz. 19
3	Energie	blz. 22
4	Rendement	blz. 27
5	Energieomzettingen	blz. 30
6	Vermogen	blz. 33
7	Opdrachten om te oefenen	blz. 36

1 arbeid

Het woord 'werk' kom je in een heleboel betekenissen tegen: 'het is een heel werk geweest', 'je werk ziet er niet al te netjes uit', 'ik heb vandaag veel werk verzet'.

In dit hoofdstuk zullen we daarom het woord 'werk' niet meer gebruiken in de zin van 'werk verrichten'. In plaats daarvan gebruiken we voortaan het woord 'arbeid'.

In deze paragraaf leer je hoe je *arbeid* kunt *meten*.

PROEF 1.1 optillen



- 1 Til een gewicht van 5 kg één meter omhoog.
- 2 Til hetzelfde gewicht nu twee meter omhoog.
Moet je nu méér moeite doen dan bij het optillen over één meter?
- 3 Til een gewicht van 10 kg één meter omhoog.
Kost dit méér moeite dan met het gewicht van 5 kg?
- 4 Til het gewicht van 10 kg nu twee meter omhoog.
Hoe zit het nu met de moeite die je moet doen?

Conclusie

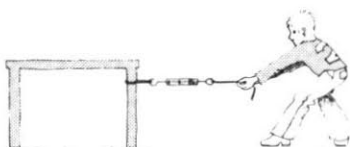
- De moeite die je moet doen hangt van twee dingen af. Welke twee?

Als je een gewicht optilt, moet je daar moeite voor doen. Die 'moeite' kun je berekenen als de *arbeid* die je hebt verricht:

$$\text{ARBEID} = \text{KRACHT} \times \text{WEG}$$

- Bereken de arbeid die je verricht hebt bij de opdrachten van proef 1.1.
- Bereken de arbeid die je verricht bij het optillen van je tas.
- Welke *eenheid* gebruik je voor het opgeven van de berekende arbeid?

PROEF 1.2 wegslepen



- 1 Bind een touw aan een tafel. Bind het andere eind aan een veerunster. Sleep de tafel over een afstand van 3 m voort. Lees intussen op de unster af welke kracht je daar ongeveer voor nodig hebt.
 - Bereken de hoeveelheid arbeid die je hebt verricht.
- 2 Zet nu een medeleerling op de tafel en herhaal de proef, eventueel met een veerunster met een groter meetbereik.
 - Bereken weer de arbeid die je hebt verricht.

PROEF 1.3 de remmende fietser

In het thema *Verkeer en veiligheid* heb je misschien (op blz. 31 en 32) de remkracht en de remweg gemeten van een remmende fiets.

Voer die proef nog eens uit. Meet de (begin)snelheid, de remkracht en de remweg.

- Bereken de arbeid die *de rem op de fiets* heeft verricht.

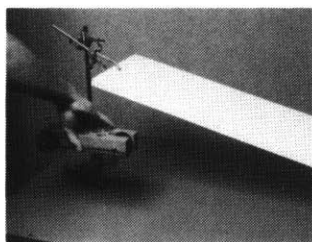
Herhaal de proef en de berekening met een andere (begin)snelheid.



PROEF 1.4 een helling op

Neem een plank van ongeveer 1,50 m lengte en een lichtlopend karretje (massa ongeveer 300 g).

Maak met wat statiefmateriaal en de plank een helling.



- Zet het karretje *naast het statief* en til het 40 cm omhoog.
- Bereken de hoeveelheid arbeid die je bij het optillen van de kar verricht.

Trek het karretje met een constante trekkracht langs de plank omhoog *tot op een hoogte van 40 cm boven de tafel*. Meet de kracht die je op de kar uitoefent met een veerunster. Meet ook de afstand die de kar langs de helling aflegt.

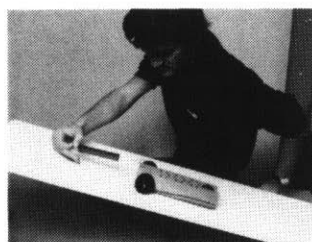
- Bereken de arbeid die je nu verricht hebt.

Maak de helling steiler. Trek het karretje weer langs de helling omhoog *tot op een hoogte van 40 cm boven de tafel*. Meet de kracht die je op de kar uitoefent en de afstand die de kar langs de helling aflegt.

Herhaal de proef voor nog steilere hellingen.

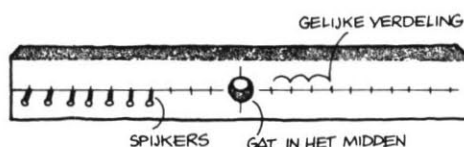
Noteer je meetresultaten in een tabel.

- Bereken in alle gevallen de verrichte arbeid. Noteer het resultaat van je berekeningen in de laatste kolom van de tabel.
- Wat valt je op bij de getallen in de laatste kolom van de tabel? Had je dat verwacht?

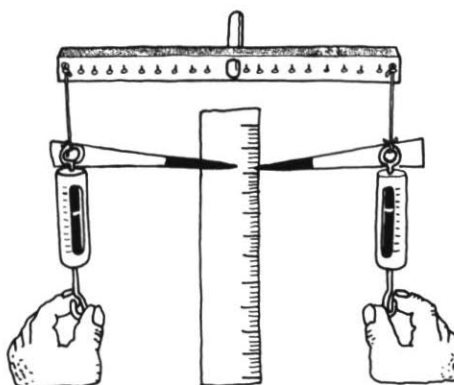


PROEF 1.5 de hefboom

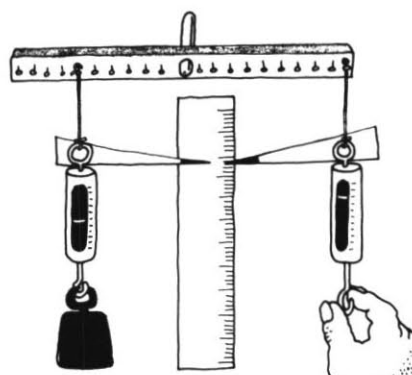
Gebruik een lat met een aantal spijkers op gelijke afstand en een gat in het midden.



- 1 Hang de lat draaibaar op en begin met twee unsters op *gelijke* afstand van het midden. Trek aan beide unsters tegelijk. Vergelijk de kracht links en rechts.



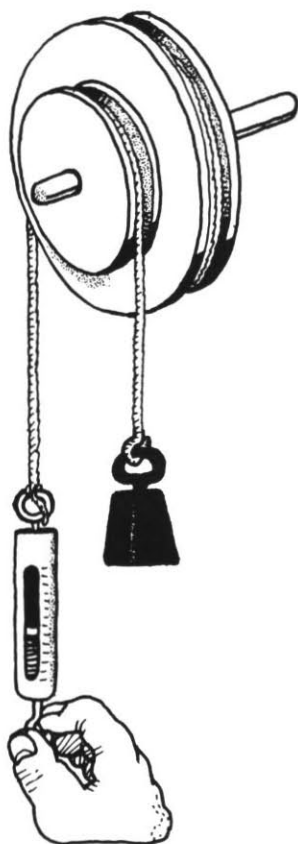
- 2 Herhaal de proef, maar nu met de veerunsters op *ongelijke* afstand van het midden.
- 3 Hang links een gewicht (aan een unster). Hang aan het uiteinde rechts alleen een unster. Trek de unster naar beneden over een zekere afstand. Meet de afstand die de unster is verplaatst. Meet ook de afstand waarover het gewicht is verplaatst.



- Bereken de arbeid die *jij* op de hefboom hebt verricht.
Bereken de arbeid die *de hefboom* op het gewicht heeft verricht.
Vergelijk de uitkomsten.
- 4 Herhaal de proef en de berekening een paar keer met andere afstanden, zowel links als rechts.

PROEF 1.6 katrollen

Gebruik twee aan elkaar vastgemaakte katrollen.



- 1 Hang aan de ene katrol een gewicht en aan de andere katrol een veerunster. Hijs het gewicht 20 cm omhoog door aan de veerunster te trekken. Meet de kracht waarmee je trekt én de afstand waarover je het touw omlaag trekt.
 - Bereken de arbeid die je verricht hebt.
 - Bereken ook hoeveel arbeid er nodig is om het gewicht direct 20 cm omhoog te tillen.
 - Vergelijk de uitkomsten.

- 2 Herhaal de proef en de berekening voor verschillende gewichten.

Conclusie

De resultaten van de proeven 1.4, 1.5 en 1.6 lijken vrij sterk op elkaar.

Als je bij proef 1.4 de helling minder steil maakt, heb je minder kracht nodig om de kar over de helling voort te trekken. Maar de afstand die de kar moet afleggen om een hoogte van bijvoorbeeld 40 cm te bereiken, wordt groter. Bereken je de arbeid, dan blijkt die bij alle hellingen gelijk te zijn. De arbeid is steeds even groot als de arbeid die je verricht als je de kar gewoon over 40 cm optilt.

Bij proef 1.5 blijkt, dat je met een hefboom de kracht waarmee je een voorwerp omhoogbrengt, kunt verkleinen. Maar dan moet je het uiteinde van de hefboom wel over een grotere afstand naar omlaag trekken dan waarover het voorwerp omhoogkomt. Ook hier is de arbeid die je verricht steeds even groot als de arbeid die je verricht als je het voorwerp gewoon zou optillen.

Proef 1.6 met de katrollen levert hetzelfde resultaat.

Je kunt dus met werktuigen, zoals een hellende plank, een hefboom of katrollen, de kracht die je nodig hebt verkleinen. Maar die kleinere kracht moet je dan steeds over een langere afstand laten werken. Daardoor moet je bij gebruik van dit soort werktuigen nog steeds *evenveel* arbeid verrichten als zonder werktuig. Het verrichten van die arbeid wordt je door het werktuig wél makkelijker gemaakt. Want de arbeid verricht je in een langere tijd (over een langere weg) en met een kleinere kracht. En dat gaat makkelijker.



2 verlies van arbeid

Bij een aantal proeven in dit thema heb je een versnellingsbak nodig. Daarom is het wel handig dat je er een beetje mee om kunt gaan. Dat leer je in proef 2.1.

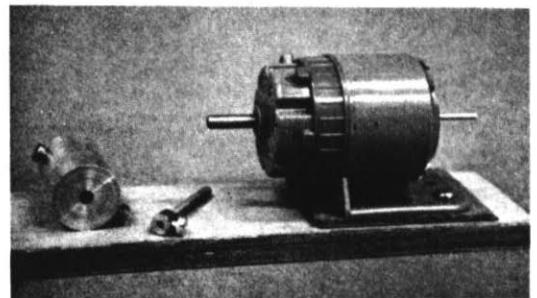
Een versnellingsbak zit ook in auto's, brommers, enz. Met zo'n versnellingsbak kun je krachten van grootte laten veranderen. Bijvoorbeeld van een kleine kracht aan de ingang van de versnellingsbak een grote kracht maken aan de uitgang. Dat maakt het optrekken van een auto of brommer gemakkelijker. Maar zo'n grote kracht krijg je niet voor niets (denk aan hoofdstuk 1): je moet de as aan de ingang van de versnellingsbak dan veel sneller laten ronddraaien dan de as aan de uitgang ronddraait.

Met een versnellingsbak kan je dus krachten overbrengen en snelheden veranderen in verschillende verhoudingen.

PROEF 2.1 de versnellingsbak

Kijk op jouw versnellingsbak naar de mogelijke verhoudingen van omwentelingssnelheden.

Draai eens wat aan de assen van de versnellingsbak.
Probeer na te gaan of het verhaal hierboven over versnellingsbakken klopt.



Versnellingsbak

Bij de volgende proef breng je de versnellingsbak aan het draaien door een gewicht aan een touw. Aan die kant van de versnellingsbak stop je er dus arbeid *in*. Aan de andere kant van de versnellingsbak hijs je daardoor een *ander* gewicht omhoog. Aan die kant moet de versnellingsbak dus zelf arbeid verrichten: er komt daar arbeid *uit*.

Het gaat bij deze proef om het berekenen van 2 hoeveelheden arbeid:

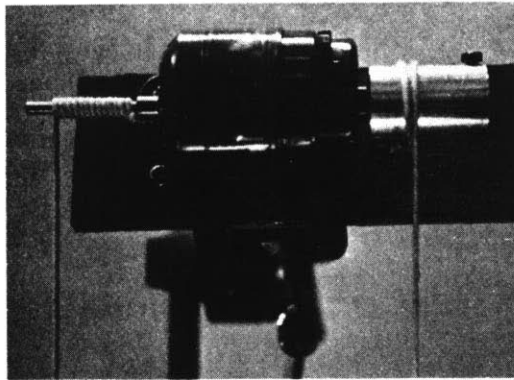
- 1 de arbeid die aan de ene kant *in* de versnellingsbak gestopt wordt
- 2 de arbeid die aan de andere kant *uit* de versnellingsbak komt

verlies van arbeid

PROEF 2.2 arbeid en verlies bij een versnellingsbak

Let er op, dat de versnellingsbak op 1:32 staat ingesteld.

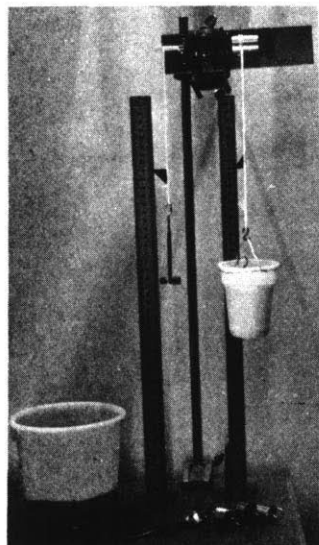
Monteer de dikke cilinder op de as aan de vertragingskant van de bak (dat is de dikkere as). En monteer de dunne cilinder op de andere as.



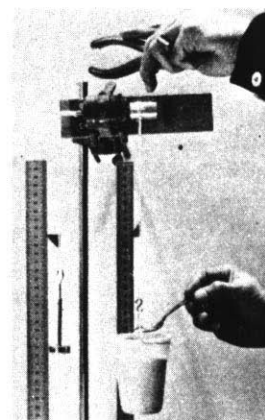
Maak nu de opstelling die je op de foto ziet afgebeeld.

- De versnellingsbak is in een statiefflem gemonteerd.
- Om de cilinders zijn touwtjes gewikkeld. Aan het ene touwtje hangt een gewicht dat wordt opgehesen, en aan het andere touwtje een plastic beker-tje waar je zand in kunt doen.
- Aan de touwtjes zijn papieren wijzertjes geplakt die langs twee verticaal opgestelde meetlatten lopen.

Door zand in het bekertje te gieten kun je er voor zorgen dat het zandbekertje net zwaar genoeg wordt om het gewicht aan de andere kant omhoog te hijsen. Blijf hierbij wel steeds met een hard voorwerp zachtjes op de bak tikken, tot dat het zandbekertje geleidelijk naar beneden gaat.



De meetopstelling



Blijf tijdens het vullen van het zandbekertje steeds zachtjes op de versnellingsbak tikken

verlies van arbeid

- 1 Meet de afstand waarover het zandbekertje zakt.
Meet de afstand waarover het gewicht stijgt.
Meet het gewicht van het zandbekertje.
 - Bereken de arbeid die *in* de versnellingsbak is gestopt (dus: bereken de arbeid die het zandbekertje heeft verricht bij het zakken).
 - Bereken de arbeid die *uit* de versnellingsbak is gekomen (dus: bereken de arbeid die nodig was om het gewicht op te hijsen).
 - Hoe groot is het verlies aan arbeid in deze versnellingsbak? (Het verschil tussen de arbeid die er in gestopt wordt en de arbeid die er uitkomt).
- 2 Herhaal de proef en de berekeningen voor de volgende gevallen:
 - Hijs aan de dunne as gewichtjes van 0,1 N, 0,2 N en 0,3 N op
 - Hijs aan de dikke as gewichtjes van 2,0 N, 2,5 N en 3,0 N op

RENDEMENT

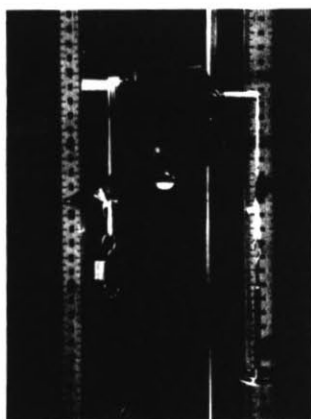
De hoeveelheid arbeid die in de versnellingsbak wordt gestopt, is niet gelijk aan de hoeveelheid arbeid die er uitkomt. Er is een verlies aan arbeid in de versnellingsbak.

- Heb je een idee waardoor dat verlies aan arbeid veroorzaakt wordt?

Hoe zuinig de versnellingsbak met de erin gestopte arbeid omspringt, kan je nagaan door het rendement te berekenen:

$$\text{RENDEMENT} = \frac{\text{ARBEID ERUIT}}{\text{ARBEID ERIN}} \times 100\%$$

GEWICHT 2,5 N
DAALT 10 cm



GEWICHT 0,3 N
STIJGT 40 cm

Hoe groter het rendement, hoe zuiniger de versnellingsbak met de erin gestopte arbeid omspringt.

- Bereken het rendement van de versnellingsbak door gebruik te maken van de resultaten van proef 2.2.

Een rekenvoorbeeld

in de versnellingsbak gestopt

$$\begin{aligned} \text{arbeid} &= \text{kracht} \times \text{weg} \\ &= 2,5 \times 0,10 \\ &= 0,25 \text{ Nm} \end{aligned}$$

uit de versnellingsbak gekomen:

$$\begin{aligned} \text{arbeid} &= \text{kracht} \times \text{weg} \\ &= 0,3 \times 0,40 \\ &= 0,12 \text{ Nm} \end{aligned}$$

Deze hoeveelheden zijn niet gelijk. Er is verlies:

$$\text{rendement} = \frac{\text{arbeid eruit}}{\text{arbeid erin}} \times 100\% = \frac{0,12}{0,25} \times 100\% = 48\%$$

3 energie

Machines verrichten arbeid voor ons. Hoeveel arbeid die machines verrichten, kun je uitrekenen als je de kracht en de afstand weet:

$$\text{ARBEID} = \text{KRACHT} \times \text{WEG}$$

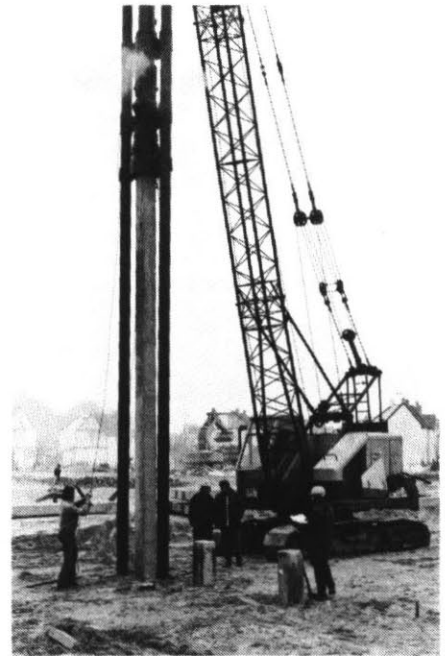
In formulevorm ziet dat er zo uit:

$$W = F s$$

Een heimachine die op stoom werkt, stoot het heiblok omhoog. De machine verricht dus arbeid *op* het heiblok. Die arbeid kan de heimachine alleen maar verrichten door van water stoom te maken. En daarvoor is *warmte* nodig.

De arbeid die door een benzinemotor wordt verricht op de wielen van de auto moet die motor halen uit de verbranding van benzine. Een machine kan alleen arbeid verrichten doordat er iets wordt toegevoerd: elektriciteit, hete stoom, benzine, enz. We zeggen nu: die dingen die worden toegevoerd, bezitten *energie*.

Een machine gebruikt energie om arbeid te verrichten.



ENERGIESOORTEN

In een aantal gevallen kun je de gebruikte hoeveelheid energie uitrekenen.

Elektrische energie

De gebruikte hoeveelheid elektrische energie kan je uitrekenen met de formule

$$E = V I t$$

Een rekenvoorbeeld

Een elektromotor betreft zijn stroom uit een voedingskast met een spanning (V) van 10 volt. De stroomsterkte (I) die hij trekt, is 0,5 ampère. De motor werkt 40 seconden (t). Dan is de gebruikte hoeveelheid *elektrische energie*:

$$E = VIt = 10 \text{ V} \times 0,5 \text{ A} \times 40 \text{ s} = 200 \text{ joule}$$

Chemische energie

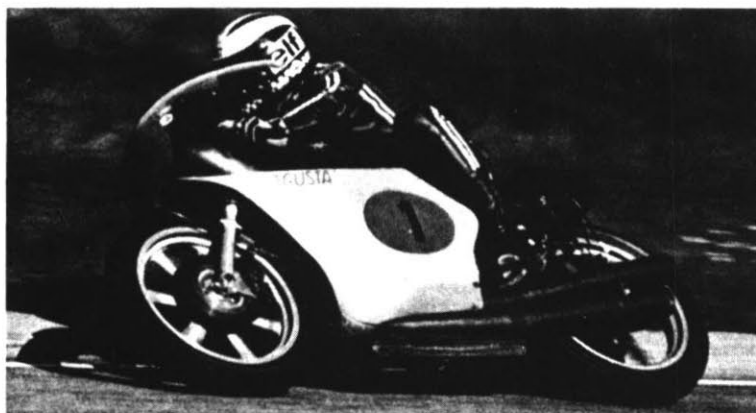
De verbranding van benzine in een brommermotor bijvoorbeeld is een voorbeeld van een chemisch proces. Telkens wanneer er energie vrijkomt uit een chemisch proces, heb je te maken met het gebruik van chemische energie.

Een rekenvoorbeeld

De motor van een brommer verbruikt in een bepaalde tijd 3 liter benzine. De verbrandingswarmte van brommerbenzine is 32×10^6 joule/liter. Dan is de gebruikte hoeveelheid *chemische energie*:

$$E = 3 \text{ liter} \times 32 \times 10^6 \text{ joule/liter} = 96 \times 10^6 \text{ joule}$$

Een ander voorbeeld van chemische energie is energie uit voedsel. Een snee bruin brood met kaas levert 78×10^4 joule. Daarmee kan een mens arbeid verrichten.



Bewegingsenergie

Ook een bewegend voorwerp bezit energie, want je kan dat voorwerp arbeid laten verrichten. Hoe?

De bewegingsenergie van een voorwerp reken je uit met de formule

$$E = \frac{1}{2} m v^2$$

Een rekenvoorbeeld

Een brommer met berijder heeft een massa van 140 kg. De snelheid is 18 km/h (= 5 m/s). De hoeveelheid *bewegingsenergie* is dan:

$$E = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{2} \times 140 \text{ kg} \times 25 \text{ m}^2/\text{s}^2 = 1750 \text{ joule}$$

Gravitatie-energie

Gravitatie-energie is de energie uit zwaartekracht. Een voorwerp dat zich boven de grond bevindt (een heiblok bijvoorbeeld) kan je loslaten. De zwaartekracht zorgt er dan voor, dat het blok valt. Het heiblok slaat de heipaal een eind verder de grond in. Het heiblok verricht dus arbeid bij het neerkomen op de paal. De energie die het heiblok daarvoor nodig heeft, is de gravitatie-energie van het blok als het nog boven is.

De gravitatie-energie van een voorwerp boven de grond kun je uitrekenen met de formule:

$$E = mgh$$

Een rekenvoorbeeld

Een heiblok met een massa van 100 kg valt van 10 m hoogte op een heipaal. Dan is de *gravitatie-energie* van het blok als het nog boven is:

$$E = mgh = 100 \text{ kg} \times 10 \text{ N/kg} \times 10 \text{ m} = 10000 \text{ joule}$$

Opmerking

Als het heiblok valt, verricht de zwaartekracht arbeid op het heiblok. Die arbeid kun je uitrekenen:

$$W = F_z \cdot s = 1000 \text{ N} \times 10 \text{ m} = 10000 \text{ Nm}$$

Je ziet dat de gravitatie-energie gelijk is aan de hoeveelheid arbeid die de zwaartekracht tijdens de val op het blok verricht, namelijk 10000 Nm. Dat ligt trouwens voor de hand, want als je goed kijkt, zie je:

$$F_z = m \cdot g \text{ en } s = h$$

Stralingsenergie

Per seconde valt op 1 m^2 (loodrecht op de zonnestraling) van het aardoppervlak rond de evenaar een stralingsenergie van 1400 joule. Deze zonne-energie kan tegenwoordig onder andere gebruikt worden voor het opwekken van elektriciteit in zonnecellen.

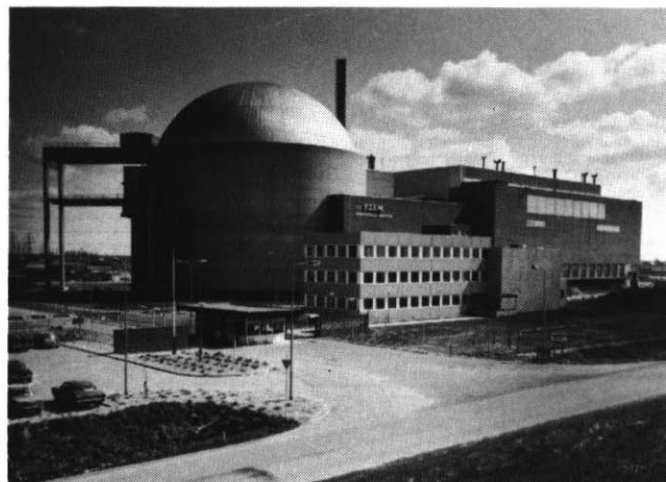
En met die elektrische energie kan je dan weer machines arbeid laten verrichten.



Langs de snelweg Utrecht-Den Haag staat ter hoogte van Nootdorp een ANWB-praatpaal die van energie wordt voorzien door een paneel met zonnecellen. Het paneel bevindt zich op de achterste mast

Kernenergie

Splijting van 1 kg uranium-235 levert $58 \cdot 10^{12}$ joule aan energie. Deze energie komt in een kernreactor vrij in de vorm van warmte. Die warmte wordt gebruikt voor het verhitten van water tot stoom. Die stoom drijft de turbines aan, en verricht dus arbeid. De turbines laten de elektrische generatoren draaien, zodat de energie die ligt opgeslagen in de atoomkernen uiteindelijk beschikbaar komt als elektrische energie.



Kernenergiecentrale te Borssele

Warmte

Ook warmte is een vorm van energie. Daarover kun je meer vinden in de leesteksten 1, 2 en 3.

DE EENHEID VAN ENERGIE EN DE EENHEID VAN ARBEID

Voor het meten van een hoeveelheid energie is afgesproken om als eenheid de *joule* te gebruiken. Als eenheid van arbeid hebben we tot nu toe de *newtonmeter* gebruikt (afgekort: Nm). Die newtonmeter hebben we verder niet meer nodig.

Kijk nog maar eens terug naar het geval van de bewegingswet uit het thema *Verkeer en veiligheid*.

$$F \cdot s = \frac{1}{2} m v_{\text{EIND}}^2 - \frac{1}{2} m v_{\text{BEGIN}}^2$$

Aan de linkerkant van de bewegingswet staat een hoeveelheid arbeid ($F \cdot s$) en aan de rechterkant een (verschil in) bewegingsenergie ($\frac{1}{2} m v^2$). Dat betekent dat een newtonmeter hetzelfde moet zijn als een joule, want anders staat er links en rechts niet hetzelfde. Je kunt als eenheid van arbeid dus ook de joule gebruiken.

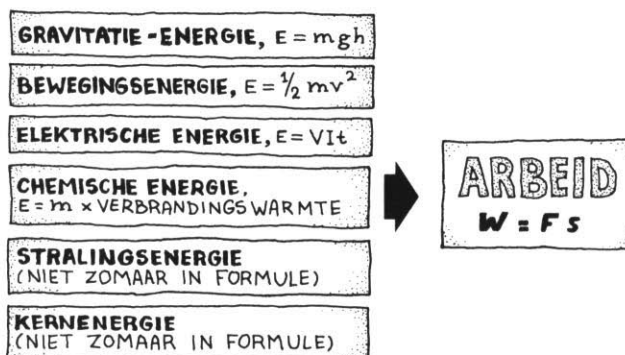
De eenheid van arbeid is hetzelfde als de eenheid van energie:
de joule (afgekort: J)

SAMENVATTING

Energie geeft aan machines de mogelijkheid om arbeid te verrichten.

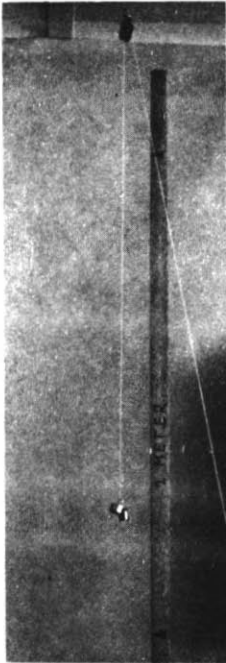
We onderscheiden een aantal soorten energie. De naam van een energiesoort heeft te maken met de bron en de manier waarop je de hoeveelheid uitrekt.

In schema:



De eenheid van energie en de eenheid van arbeid is de joule (afgekort: J)

4 rendement



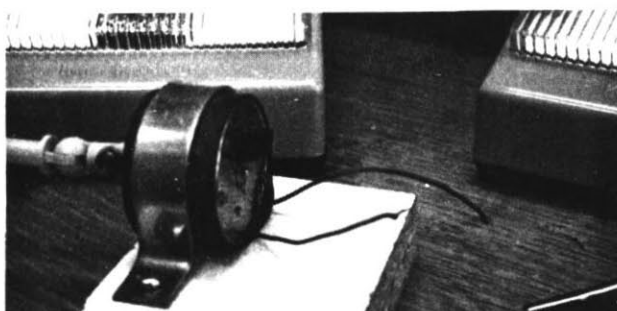
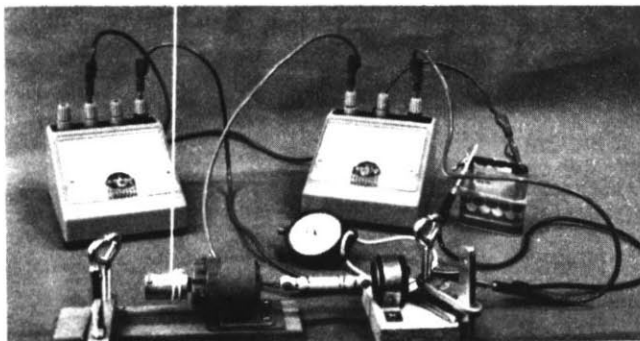
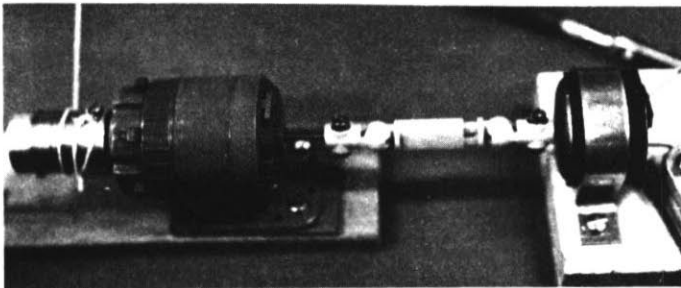
Met een elektromotortje kan je een speelgoedtrein laten rijden of een speelgoedhijskraan een gewicht laten ophijzen. De elektromotor verricht dan arbeid.

De elektromotor krijgt zijn (elektrische) energie uit een batterij of een voedingskastje. Die energie wordt gebruikt voor het omhooghijsen van het gewicht of voor de beweging van de trein (dus: om arbeid te verrichten).

Maar je kunt de zaak ook omdraaien: arbeid verrichten en daarmee elektrische energie maken. Daarvoor gebruik je geen elektromotor, maar een dynamo. Als je de as van de dynamo ronddraait (er arbeid instopt dus), krijg je er elektrische energie uit. Met die elektrische energie kan je bijvoorbeeld een lamp laten branden.

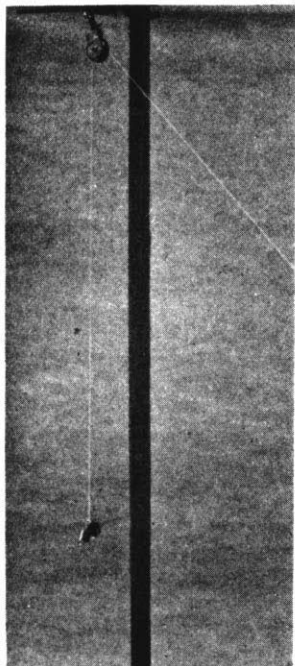
PROEF 4.1 hijsen met een elektromotor

Bij deze proef ga je met een elektromotor een gewicht ophijzen. Daarbij meet je hoeveel elektrische energie er in de motor gestopt wordt, en hoeveel arbeid er uit de motor komt (dus: hoeveel arbeid de motor verricht).



Een klein elektromotortje loopt op een 4,5 volt batterij. Het elektromotortje drijft de dunne as van de versnellingsbak aan. Deze is op 1:32 afgesteld. De andere as hijst door middel van een over een katrol hangend touw een gewicht omhoog.

- 1 Bouw de meetopstelling.
 - 2 Om de elektrische energie die aan de elektromotor wordt toegevoerd te kunnen berekenen, moet je de *spanning* over en de *stroom* door de elektromotor meten. Doe dit door een spanningmeter en een stroommeter in de opstelling op te nemen.
 - 3 Hijs gewichten van 1,0 N, 1,5 N, 2,0 N, 2,5 N en 3,0 N op over een afstand van 1 m. Meet hierbij steeds:
 - de spanning over de motor
 - de stroom door de motor
 - de tijd die nodig is om het gewicht 1 m omhoog te hijsen.Noteer je meetresultaten in een tabel.
- Bereken in alle gevallen de elektrische energie die de elektromotor nodig had.
 - Bereken in alle gevallen de arbeid die de elektromotor verricht heeft bij het ophijzen van het gewicht.
 - Welke conclusie trek je uit deze proef?



PROEF 4.2 een lamp laten branden op een dynamo

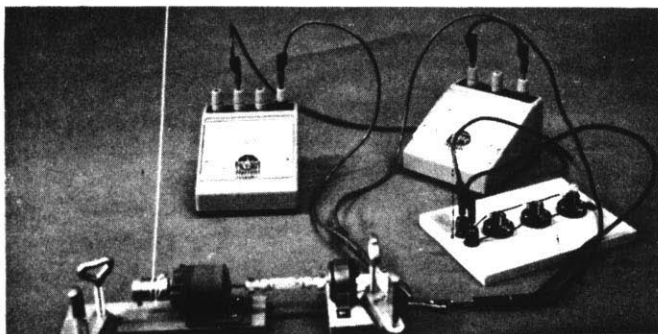
Bij deze proef ga je een lamp laten branden op een dynamo. Daarbij meet je hoeveel arbeid er in de dynamo gestopt wordt, en hoeveel elektrische energie de dynamo levert.

De versnellingsbak wordt aangedreven door een vallend gewicht. De bak is op 1:32 ingesteld.

De dunne as van de versnellingsbak drijft de dynamo aan. De dynamo levert dan elektrische energie, die een lampje van 6 V en 0,04 A laat gloeien.

- 1 Bouw de meetopstelling.
- 2 Om de elektrische energie die de dynamo levert te kunnen berekenen, moet je de *spanning* over en de *stroom* door het lampje meten.
Doe dit door een spanningmeter en een stroommeter in de opstelling op te nemen.
- 3 Laat gewichten van 3,0 N, 3,5 N, 4,0 N, 4,5 N, 5,0 N en 5,5 N vallen over een hoogte van 1 m. Meet hierbij steeds:
 - de spanning over het lampje
 - de stroom door het lampje
 - de tijd die nodig is om het gewicht 1 m te laten dalen.

Noteer je meetresultaten in een tabel.



- Bereken in alle gevallen de arbeid die door het vallende gewicht in de dynamo gestopt is.
- Bereken in alle gevallen de elektrische energie die de dynamo aan het lampje geleverd heeft.
- Welke conclusie trek je uit deze proef?

RENDEMENT

Bij de proeven 4.1 en 4.2 heb je wel gemerkt dat er *verliezen* optreden. De arbeid die de elektromotor verricht bij proef 4.1 is kleiner dan de hoeveelheid elektrische energie die je erin stopt. En bij de dynamo van proef 4.2 geldt ook zo iets: de elektrische energie die de dynamo levert, is kleiner dan de arbeid die erin gestopt wordt.

Net als bij de versnellingsbak van proef 2.2 kan je het rendement van de elektromotor en de dynamo uitrekenen.

Bij de versnellingsbak werd het rendement gegeven door:

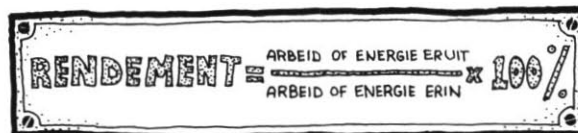
$$\text{RENDEMENT} = \frac{\text{ARBEID ERUIT}}{\text{ARBEID ERIN}} \times 100\%$$

rendement

- Hoe zou je het rendement van de elektromotor uit proef 4.1 berekenen? Voer die berekening uit.
- Hoe zou je het rendement van de dynamo uit proef 4.2 berekenen? Voer die berekening uit.

Bij de ene machine stop je er arbeid in en krijg je er ook weer arbeid uit (de versnellingsbak). Bij de andere machine stop je er energie in en je krijgt er arbeid uit (de elektromotor bijvoorbeeld). Bij weer een andere machine stop je er arbeid in en krijg je er energie uit (de dynamo).

Van al die machines kan je op dezelfde manier het rendement uitrekenen, door de arbeid of energie die er uit komt te delen door de arbeid of energie die er in gaat:


$$\text{REndEMENT} = \frac{\text{ARBEID OF ENERGIE ERUIT}}{\text{ARBEID OF ENERGIE ERIN}} \times 100\%$$

Een rekenvoorbeeld

Bij proef 4.1 hijst de elektromotor een gewicht van 0,20 N in 2,5 s over 1,5 m omhoog.

De verrichte arbeid is dan:

$$W = F \cdot s = 0,20 \times 1,5 = 0,30 \text{ J}$$

Tijdens het hijsen wijst de spanningsmeter 4,0 V aan en de stroomsterkte is 0,10 A.

De gebruikte hoeveelheid elektrische energie is dan:

$$E = VIt = 4,0 \times 0,10 \times 2,5 = 1,0 \text{ J}$$

Het rendement van de elektromotor bereken je in dat geval met:

$$\text{rendement} = \frac{\text{arbeid eruit}}{\text{energie erin}} = \frac{0,30}{1,0} \times 100\% = 30\%$$

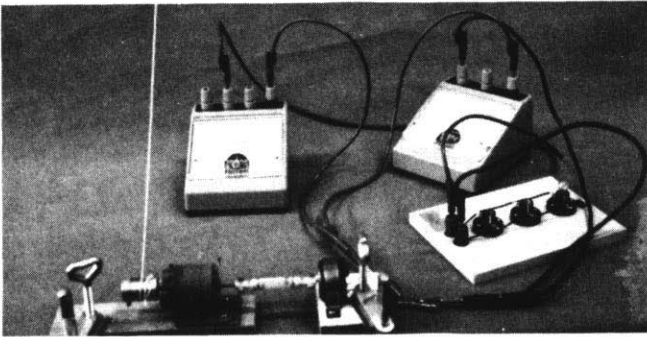
Bij je berekeningen over het rendement bij de proeven 4.1 en 4.2 heb je eigenlijk niet het rendement van de elektromotor berekend, maar het rendement van *motor en versnellingsbak samen*. Bij proef 2.2 heb je gemerkt dat er ook in de versnellingsbak verliezen optreden.

- Probeer, als je daar zin in hebt, eens uit te rekenen hoe groot het rendement van de elektromotor zelf is. Als gegeven heb je het rendement van de versnellingsbak (proef 2.2) en het rendement van elektromotor en versnellingsbak samen (proef 4.1). Zo'n zelfde berekening kan je ook uitvoeren voor de dynamo (proef 4.2).

In de leesteksten 1, 4 en 5 vind je meer informatie over het rendement van machines en over de pogingen om een apparaat te maken dat eeuwigdurend beweegt zónder dat je er energie in hoeft te stoppen (een zgn. 'perpetuum mobile').

5 energieomzettingen

In deze paragraaf zullen we laten zien dat alle machines waarmee je tot nu toe gewerkt hebt, eigenlijk de ene soort energie omzetten in een andere soort (en soms in dezelfde soort).



VAN ARBEID NAAR ENERGIE

Bekijk proef 4.2 nog eens. Daar werd arbeid verricht *door* de zwaartekracht *op* het systeem. Het hele systeem leverde uiteindelijk elektrische energie aan het lampje.

Je zou dit als volgt in een schema kunnen zetten:

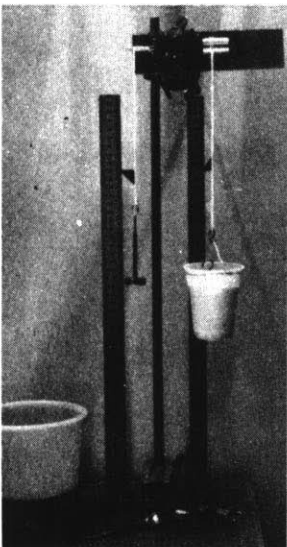


VAN ENERGIE NAAR ENERGIE

Maar je kunt het ook nog anders bekijken. Het gewicht heeft *gravitatie-energie* (net als het heiblok op blz. 24). Bij het dalen van het gewicht wordt die gravitatie-energie gebruikt om arbeid te verrichten *op* de versnellingsbak met de dynamo. Dus zou je het proces van proef 4.2 ook kunnen beschrijven met het volgende schema:



Laten we op die manier ook eens naar de andere proeven kijken.



Bij proef 2.2 heeft het bekertje met zand gravitatie-energie. Daardoor kan het arbeid verrichten op de versnellingsbak. De versnellingsbak verricht daardoor arbeid op het gewicht aan de andere kant. Het gewicht krijgt daardoor gravitatie-energie. Je hebt in de opdrachten bij proef 2.2 uitgerekend hoeveel van elk van die dingen.

- Kijk nu nog eens naar je uitkomsten en wijs de twee genoemde hoeveelheden gravitatie-energie eens aan.

In deze proef hadden we dus de omzetting:



Bij proef 4.1 wordt elektrische energie toegevoerd aan de elektromotor. Het systeem verricht arbeid op het gewicht aan de katrol. Dat gewicht krijgt daardoor meer gravitatie-energie. Dus:

energieomzettingen



Zo zijn er nog veel meer voorbeelden te noemen waarbij je het proces (dat wat er gebeurt) kunt beschrijven met behulp van een *energieomzetting*.

- Het optillen van een last (al of niet met een hefboom of een katrol) uit hoofdstuk 1.:



- De heimachine uit hoofdstuk 3.
Als het blok naar boven gestoten wordt:



Als het blok naar beneden valt:



Bij dit laatste voorbeeld zie je dat de gravitatie-energie wordt omgezet in de energiesoorten warmte en geluid.

Die *warmte* ontstaat op twee manieren:

- 1 bij de botsing van het heiblok op de paal (sla maar een paar keer met een hamer op een blok hout en voel daarna de kop van de hamer en de plaats waar je op het blok hout geslagen hebt)
- 2 door de wrijving van de paal met de grond (wrijf je handen maar eens een paar keer stevig langs elkaar).

Het *geluid* is de klap die je hoort als het blok op de paal terecht komt. Ook geluid is een energiesoort. 'Geluid' is namelijk een trilling van de lucht. En trilling betekent beweging. In hoofdstuk 3 heb je geleerd dat iets wat beweegt *bewegingsenergie* bezit.

- De remproeven met de fiets uit het thema *Verkeer en veiligheid*:



- Bij een automotor.
Als de auto optrekt:



energieomzettingen

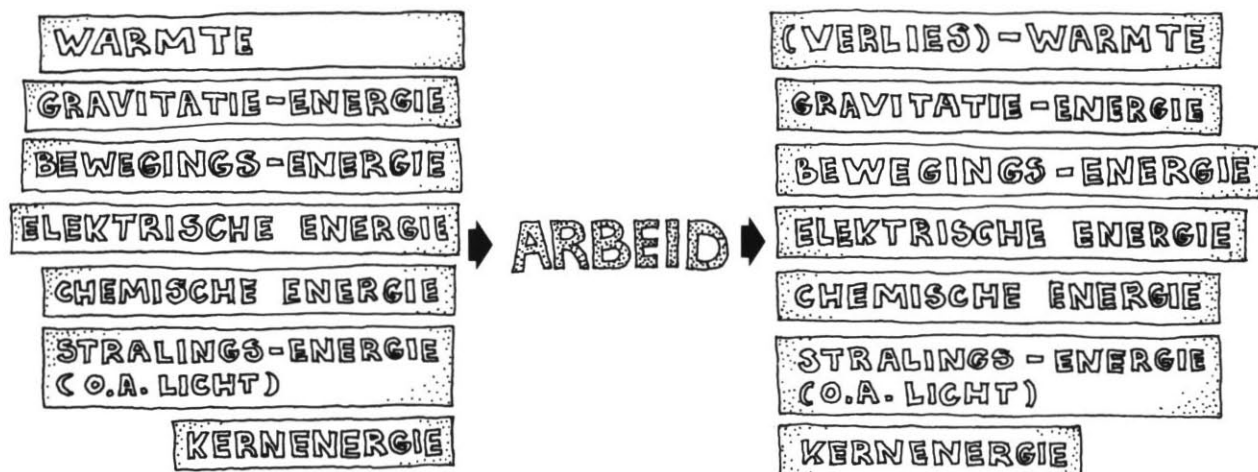
SAMENVATTING

We kunnen in het algemeen vaststellen:

Ieder proces van energie-omzetting is te beschrijven met het volgende schema:



Wat meer uitgewerkt ziet het schema er als volgt uit:



Als je nu nog eens kijkt naar alle machines die je tot dusver hebt gezien, kun je concluderen:

iedere machine is een energie-omzetter

Bij iedere energie-omzetting in een machine wordt (aanwijsbaar!) arbeid verricht.

6 vermogen

Machines gebruiken energie voor het verrichten van arbeid.

Om te weten welke machine het sterkst is, moet je de arbeid die ze verrichten eerlijk kunnen vergelijken. We geven daarvan eerst twee voorbeelden.

Voorbeeld 1

Een 2 CV trekt in 20 s op vanuit stilstand tot een snelheid van 80 km/h. Een BMW doet daar maar 8 s over. En die BMW is nog veel zwaarder ook. Dus is die BMW-motor sterker, omdat de motor in een kortere tijd een zwaardere auto op snelheid brengt. Er wordt door de BMW-motor in een kortere tijd méér arbeid verricht.

Voorbeeld 2

Een elektromotor hijst in 10 s een gewicht van 10 N over 1 m omhoog. Een andere elektromotor doet daar maar 5 s over. Beide motoren hijsen een gewicht van 10 N over 1 m omhoog: ze verrichten dus *dezelfde arbeid*. Maar de tweede motor is sterker, want hij heeft er minder tijd voor nodig.

Om te weten welke machine het sterkst is, moet je dus weten hoeveel arbeid er verricht wordt, maar ook de tijd die daarvoor nodig is. Je vergelijkt de arbeid die de machines per seconde kunnen verrichten.

- Bereken de arbeid die de motoren uit voorbeeld 2 per seconde verrichten. Welke motor is volgens deze berekeningen het sterkst?

De arbeid die een machine per seconde kan leveren, noem je het *vermogen*. Het vermogen kun je uitrekenen door de verrichte arbeid te delen door de tijd die daarvoor nodig is:


$$\text{VERMOGEN} = \frac{\text{ARBEID}}{\text{TJD}}$$

De eenheid van vermogen is de watt (afgekort: W).

Een machine als een dynamo levert (elektrische) energie. Een dynamo in een elektriciteitscentrale (een generator) kan in dezelfde tijd meer elektrische energie leveren dan je fietsdynamo. Ook hier kun je de sterkte van een dynamo bepalen door te kijken naar de (geleverde) energie per seconde.

Wat meer algemeen kun je het vermogen van een apparaat dus uitrekenen met:


$$\text{VERMOGEN} = \frac{\text{ARBEID OF ENERGIE}}{\text{TJD}}$$

- Bereken uit de meetresultaten van proef 4.1 het vermogen van de elektromotor.
- Bereken uit de meetresultaten van proef 4.2 het vermogen van de dynamo.

vermogen

We hebben nu steeds gekeken naar de arbeid of de energie die een machine *levert*. Maar een machine *gebruikt* ook energie. Ook het energiegebruik van een apparaat wordt opgegeven in een aantal joule per seconde. Apparaten hebben dus altijd *twee* vermogens: de energie (of arbeid) die je er per seconde instopt en de energie (of arbeid) die er per seconde uitkomt.

Je zou kunnen praten over het 'ingangsvermogen' en het 'uitgangsvermogen' van een machine.

Deze vermogens verschillen van elkaar, want bij elke energie-omzetting in een machine heb je te maken met verliezen.

wasmachine		type: T9
220 volt	50 Hz	zekerh: 15 AHLS.S
max.opname: 3300 W		wasmotor: 165 W
verwarming: 1300 W		pomp: 60 W

Typeplaatje van een wasmachine. Je ziet dat het ingangsvermogen groter is dan het uitgangsvermogen

- Bereken uit de meetresultaten van proef 4.1 het ingangsvermogen van de elektromotor.
- Bereken uit de meetresultaten van proef 4.2 het ingangsvermogen van de dynamo.

RENDEMENT

Omdat vermogen niets méér is dan arbeid of energie per seconde, kan je het rendement van een machine ook uitrekenen door het uitgangsvermogen en het ingangsvermogen op elkaar te delen:

$$\text{RENDEMENT} = \frac{\text{UITGANGSVERMOGEN}}{\text{INGANGSVERMOGEN}} \times 100\%$$

- Bepaal op deze manier het rendement van de elektromotor uit proef 4.1 en de dynamo uit proef 4.2. Kloppen de resultaten van je berekeningen met de rendementen die je in hoofdstuk 4 hebt gevonden?

vermogen

Een rekenvoorbeeld

Bij proef 4.1 hijst de elektromotor een gewicht van 0,20 N in 2,5 s over 1,5 m omhoog.

Het uitgangsvermogen van de elektromotor is dan te berekenen:

$$\text{uitgangsvermogen} = \frac{W}{t} = \frac{0,20 \times 1,5}{2,5} = 0,12 \text{ W}$$

Tijdens het hijsen wijst de spanningsmeter 4,0 V aan en de stroomsterkte is 0,10 A.

Het ingangsvermogen van de elektromotor is dan te berekenen:

$$\text{ingangsvermogen} = \frac{E}{t} = \frac{V \cdot I \cdot t}{t} = \frac{4,0 \times 0,1 \times 2,5}{2,5} = 0,40 \text{ W}$$

Het rendement wordt dan:

$$\text{rendement} = \frac{\text{uitgangsvermogen}}{\text{ingangsvermogen}} \times 100\% = \frac{0,12}{0,40} \times 100\% = 30\%$$

En dat klopt; kijk maar eens terug naar het rekenvoorbeeld in hoofdstuk 4 op blz. 29.

Opmerking

In het rekenvoorbeeld hierboven is onder andere het ingangsvermogen van een elektromotor berekend met:

$$\text{ingangsvermogen} = \frac{E}{t} = \frac{V \cdot I \cdot t}{t} = V \cdot I$$

Dat klopt met wat je in het thema *Energie thuis* geleerd hebt:

• VERMOGEN = SPANNING × STROOM •

Voor het berekenen van het elektrisch vermogen heb je dus de tijd helemaal niet nodig; spanning en stroomsterkte zijn voldoende.

7 opdrachten om te oefenen

- 1 Een hijskraan hijst een last met een gewicht van 4000 N op over een afstand van 12 m.
Hoeveel arbeid verricht de hijskraan?

- 2 Een auto overwint een constante wrijvingskracht van 1800 N. Hij legt daarbij een afstand van 6 km af.
Hoeveel arbeid verricht de auto?

- 3 Een steen van 3 kg valt over een afstand van 20 m naar beneden. Hoeveel arbeid verricht de zwaartekracht?

- 4 Met het katrolsysteem dat hiernaast is getekend, moet ik een piano van 80 kg over 6 m omhoog hijsen.

- a Hoeveel arbeid moet ik daarvoor verrichten?

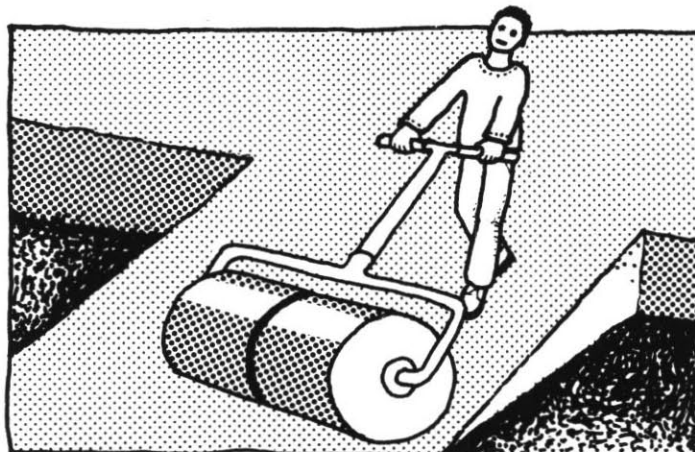
Het katrolsysteem zorgt ervoor dat de kracht waarmee ik moet hijsen driemaal zo klein wordt.

- b Bereken de lengte van het touw dat ik moet inhalen.



- 5 Langs een hellende plank trek ik een wals (zo'n ding voor tennisbanen of voetbalvelden) van 100 kg op het terras. De plank is 5 m lang en het terras is 1 m hoog.

- a Bereken de arbeid die ik moet verrichten om de wals het terras op te trekken.
b Bereken de kracht waarmee ik aan de wals moet trekken om hem over de plank het terras op te krijgen.
c Lukt het om op deze manier de wals het terras op te krijgen, denk je? En het ding gewoon optillen?



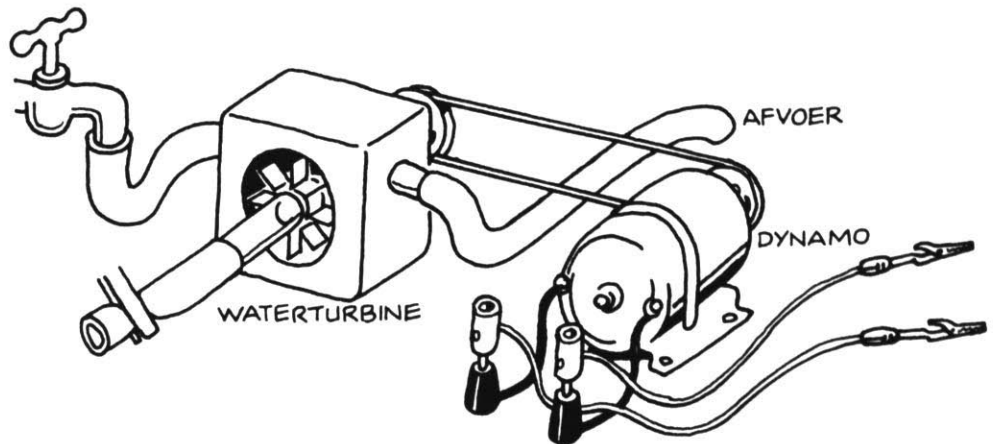
opdrachten om te oefenen

6 Beschrijf welke soort energie in welke wordt omgezet en waar en hoe arbeid wordt verricht in de volgende gevallen.

- a Een man tilt met een katrolsysteem een grote kist op.
- b Een elektrisch aangedreven hijskraan tilt een betonnen paneel van een vrachtauto op het opslagterrein.
- c Met behulp van verbranding van stookolie wordt in een elektrische centrale elektriciteit opgewekt.
- d In bergstreken wordt elektriciteit opgewekt door water uit een stuwmeer door buizen naar beneden te laten vallen en dan door schoepenraderen generatoren in beweging te zetten.

7 Welke energieomzettingen kun je ontdekken?

- a Ik blaas een ballon op en laat hem los.
- b Het proefje uit *Werken met water*, waarin een turbine een dynamo aandrijft.
- c Een auto die met constante snelheid rijdt.
- d Een man die een steen omhooggooit.
- e Een hoogspringer die over een lat springt.



8 Hoe groot is het vermogen dat wordt geleverd door een man die in 20 s een vat van 80 kg over 12 m omhoog hijst?

9 Wat is het vermogen van jezelf als je in 2 s een trap van 3 m hoog oprent en je weegt 60 kg.

Als de school een trap heeft, voer dan zelf de metingen uit die nodig zijn om je vermogen te bepalen.

Vergelijk jouw vermogen met dat van anderen.

10 Vergelijk het vermogen van verschillende van je klasgenoten eens op de volgende manier:

- meet de hoogte van een stoel
- meet het gewicht van je klasgenoten
- laat ze zo snel mogelijk 20 maal op de stoel stappen en meet de tijd die ze erover doen

opdrachten om te oefenen

Met deze gegevens moet je van iedere klasgenoot het vermogen kunnen berekenen. Ga je gang.

- 11 Een auto moet bij een snelheid van 72 km/h (20 m/s) in totaal een remmende kracht (wrijving van assen en lucht) overwinnen van 1500 N. Welk vermogen ontwikkelt die auto?

Opmerking:

Het vermogen van auto's staat meestal in pk's. En 1 pk = 750 W. Kan je nu uitrekenen hoe groot het vermogen van de auto in pk is?

- 12 Een pomp pompt in 1 minuut 75 liter water over 5 m omhoog (1 liter water weegt 1 kg).

- a Hoeveel arbeid verricht die pomp in 1 minuut?
- b Hoe groot is het vermogen van die pomp?

De pomp wordt aangedreven door een elektromotor. Deze elektromotor werkt op een spanning van 220 V en trekt een stroom van 0,35 A.

- c Hoe groot is het ingangsvermogen van de elektromotor?
- d Hoe groot is het rendement van het pompsysteem?

inhoud

1	Het rendement van een versnellingsbak	Hierbij onderzoek je of het rendement van een versnellingsbak afhangt van de belasting van de versnellingsbak.	blz. 41
2	Het rendement van een elektromotor	Hierbij onderzoek je of het rendement van een elektromotor afhangt van de belasting en van het toerental van de motor.	blz. 43
3	Het rendement van een elektromotor-dynamo-systeem	Hierbij bepaal je het rendement van een systeem waarbij een elektromotor een dynamo aandrijft en omgekeerd. Je gaat na of het toerental van het systeem invloed heeft op het rendement.	blz. 45
4	Wrijvingswarmte	Bij dit onderzoek probeer je aan te tonen dat alle arbeid die een wrijvingskracht verricht, wordt omgezet in warmte.	blz. 47
5	De valbuis	Bij dit onderzoek probeer je aan te tonen dat de gravitatie-energie van een voorwerp na het vallen geheel is omgezet in warmte.	blz. 48

keuzeonderzoeken

6	Het rendement van een bromfietsmotor	Hierbij bepaal je het rendement van een bromfietsmotor, en je onderzoekt of dit rendement afhangt van de belasting van de motor.	blz. 49
	Instructie Arbeid meten met behulp van een sleeprol	Deze instructie heb je nodig voor het uitvoeren van de onderzoeken 1 tot en met 4.	blz. 52

het rendement van een versnellingsbak

Onderzoek 1

De vraag waarop je bij dit onderzoek een antwoord probeert te vinden, is: hangt het rendement van de versnellingsbak af van de belasting van de versnellingsbak?

Lees voordat je dit onderzoek begint eerst de instructie 'arbeid meten met behulp van een sleeptouw' op blz. 52.

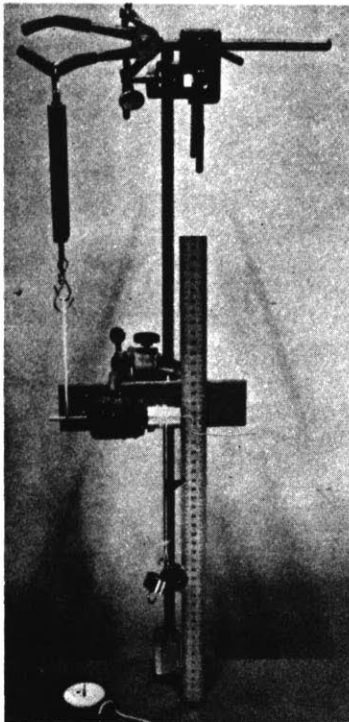


Foto 1

De opstelling voor deze proef zie je op foto 1 en 2 afgebeeld. De dunne as van de versnellingsbak wordt afgeremd door middel van een sleeptouw. De remkracht (wrijvingskracht) kan je bepalen door de kracht die je op de veerunsters (foto 3) afleest van elkaar af te trekken. De grootte van deze remkracht kun je regelen door middel van de onderste schroef van de statieklauw (zie de pijl op foto 4).

Aan het touwtje dat om de dikke cilinder is gewikkeld, hangen gewichtjes.

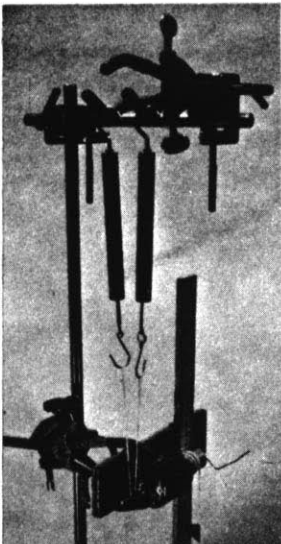


Foto 2

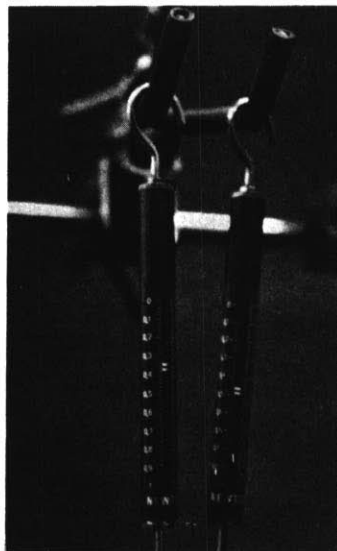


Foto 3

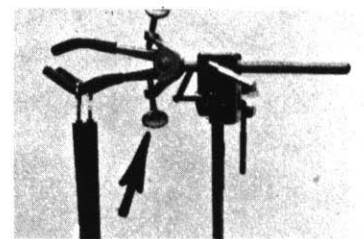
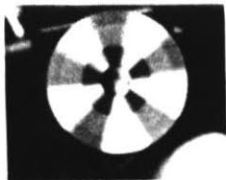


Foto 4

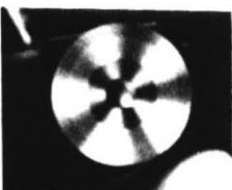
het rendement van een versnellingsbak

- 1 Bepaal de valtijd van een gewicht van 0,5 N over een afstand van 30 cm bij de dikke cilinder, als de remkracht nul is.
- 2 Laat nu achtereenvolgens gewichten van 1 N, 2 N en 3 N vallen. Zorg er in al deze drie gevallen voor dat de remkracht zó groot is, dat de gewichtjes dezelfde tijd (die je hierboven hebt bepaald) nodig hebben om over een afstand van 30 cm te vallen. Dan is het toerental van de versnellingsbak steeds hetzelfde.
 - Bereken steeds de hoeveelheid arbeid die het gewicht op de versnellingsbak verricht.
 - Bereken steeds de arbeid die de versnellingsbak op de sleeprol verricht.
 - Bereken het rendement van de versnellingsbak.
 - Welke conclusie trek je uit deze proef?
- 3 Een andere manier om deze proef te doen, is door met de hand te trekken aan het touw rond de dikke rol. Je krijgt dan wel problemen met het meten van de arbeid die je zelf verricht. Probeer daar eens een oplossing voor te vinden.

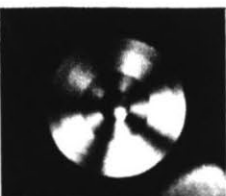
het rendement van een elektromotor



10 omw/s



20 omw/s



30 omw/s



40 omw/s



50 omw/s

De vraag waarop je bij dit onderzoek een antwoord probeert te vinden, is: hangt het rendement van de elektromotor af van de belasting van de motor en van het toerental van de motor?

Lees voordat je dit onderzoek begint eerst de instructie 'arbeid meten met behulp van een sleeprol' op blz. 52.

Een elektromotor wordt aangesloten op een regelbare spanningsbron. Een stroommeter en een spanningsmeter zijn in de keten van de elektromotor geschakeld (zie foto 1).

Het touw slipt over de dikke cilinder die op de as van de elektromotor is gemonteerd. De slipkracht — of de wrijvingskracht — kun je bepalen door de krachten die je op de veerunsters afleest van elkaar af te trekken (zie foto 2).

De grootte van de slipkracht kun je regelen met de onderste schroef in de statiefklaus (zie de pijl in foto 3).

Het aantal omwentelingen van de as van de elektromotor bepaal je met behulp van een stroboscoopschijf en een neonlampje, dat 50 keer per seconde aan en uit gaat. De draaisnelheid van de elektromotor kan je veranderen met de regelknop van de spanningsbron.

De fotoserie hiernaast laat zien welk beeld de door het neonlampje belichte draaiende stroboscoopschijf geeft bij 10, 20, 30, 40 en 50 omwentelingen per seconde.



Foto 3

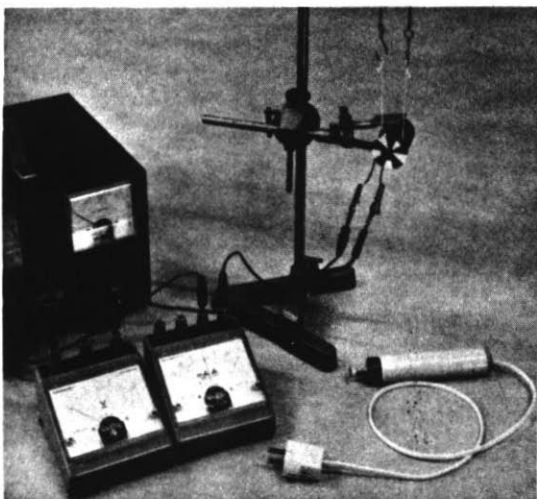


Foto 1

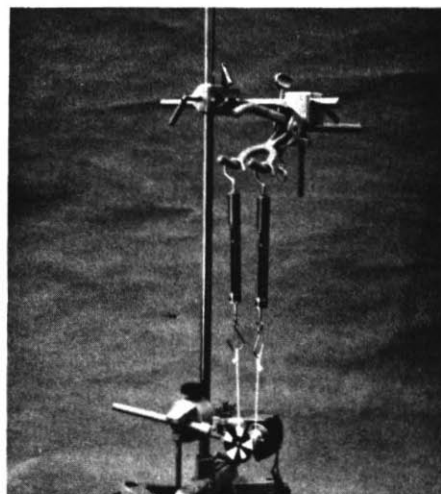


Foto 2

het rendement van een elektromotor

- 1 Meet bij een slipkracht van 0,1 N:
 - het in de motor gestopte elektrische vermogen
 - de door de motor per seconde geleverde arbeid (het arbeidsvermogen) bij toerentallen van 10, 20, 30, 40 en 50 omw/s.
- Bereken in al deze gevallen het rendement van de motor.
- 2 Herhaal de proef en de rendementsberekening bij slipkrachten van 0,2 N, 0,3 N, 0,4 N en 0,5 N.
- Welke conclusie(s) trek je uit deze proef?
In welk geval geeft de motor het hoogste rendement?

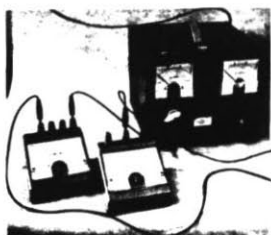
het rendement van een elektromotor-dynamosysteem

De vraag waarop je bij dit onderzoek een antwoord probeert te vinden, is: hangt het rendement van een elektromotor-dynamosysteem af van het toerental?

PROEF 1 een elektromotor drijft een dynamo aan

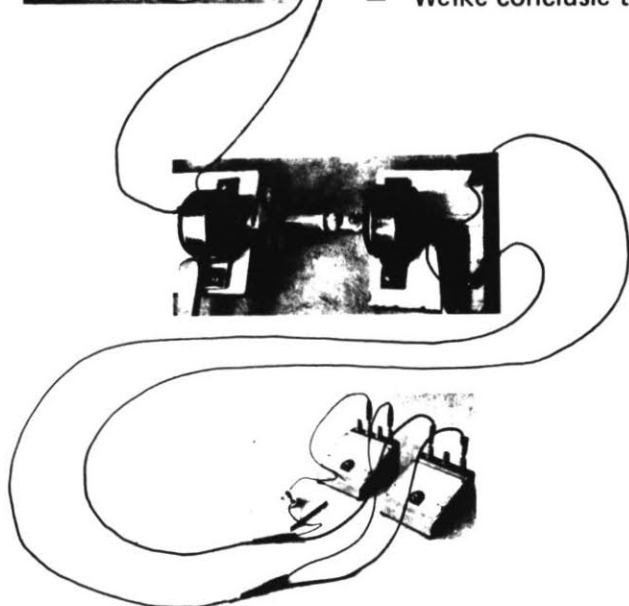
De elektromotor wordt aangesloten op een regelbare spanningsbron. Om te kunnen meten hoe groot het elektrische vermogen is dat door deze spanningsbron aan de elektromotor wordt toegevoerd, zijn een spanningsmeter en een stroommeter in het voedingscircuit opgenomen.

De as van de elektromotor is rechtstreeks verbonden met de as van een dynamo. Op deze as is een stroboscoopschijfje gemonteerd. In Onderzoek 2 staat beschreven hoe je hiermee het toerental kunt bepalen.



Op de dynamo is een fietslampje aangesloten. Om te kunnen meten hoe groot het vermogen is dat de dynamo levert, zijn een stroommeter en een spanningsmeter in de keten opgenomen.

- Bepaal het rendement van dit elektromotor-dynamosysteem bij de volgende omwentelingssnelheden: 10, 20, 30, 40, 50 omw/s.
- Welke conclusie trek je uit deze proef?



het rendement van een elektromotor-dynamosysteem

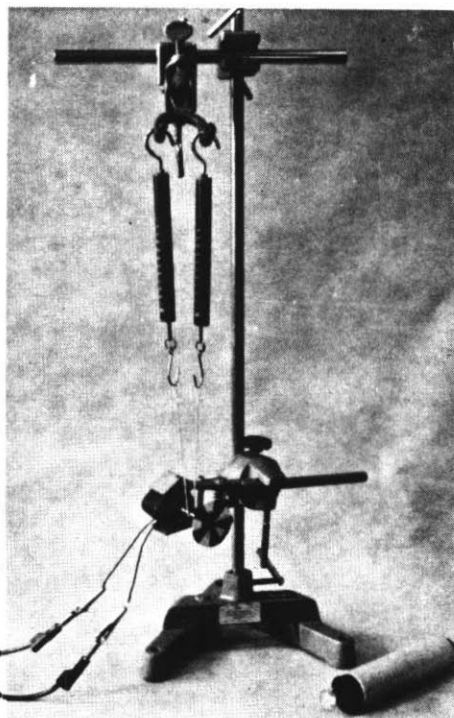
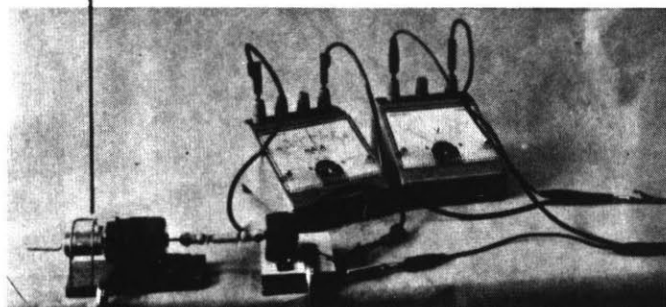
PROEF 2 een dynamo drijft een elektromotor aan

Lees voordat je deze proef uitvoert, eerst de instructie 'arbeid meten met behulp van een sleeptol': op blz. 52.

De dynamo wordt via een versnellingsbak aan het draaien gebracht door een vallend gewicht van 250 gram. De versnellingsbak is ingesteld op 1:16. Je moet er voor zorgen dat het gewicht over een afstand van twee meter kan vallen.

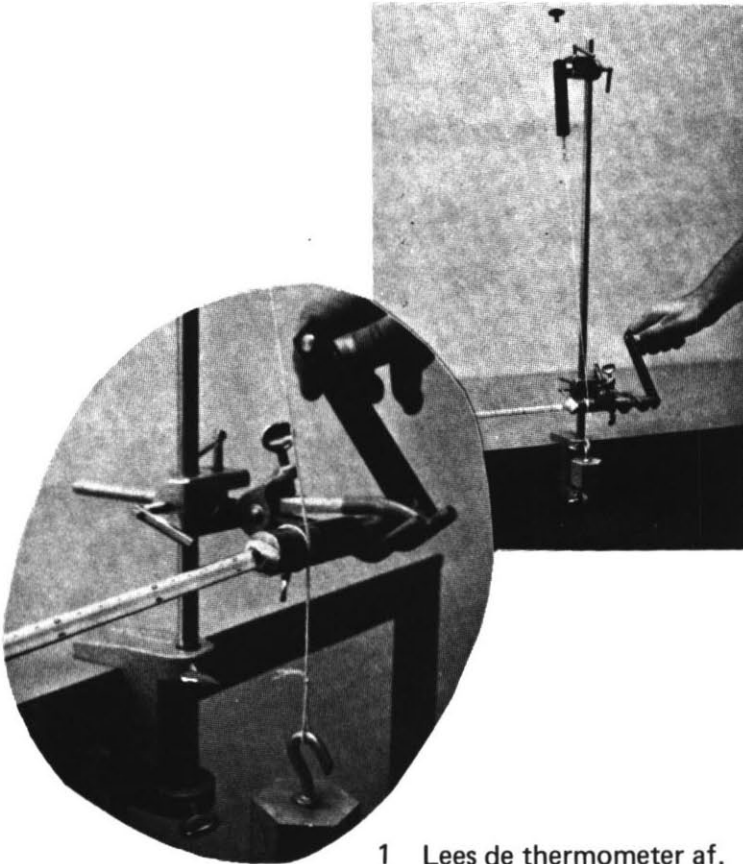
Dus: het vallende gewicht drijft de versnellingsbak aan — de versnellingsbak drijft de dynamo aan — de dynamo geeft zijn elektrische vermogen aan een elektromotor af. Om te kunnen meten hoe groot dit vermogen is, zijn een stroommeter en een spanningsmeter in de keten van de dynamo opgenomen. De draaiende elektromotor wordt afgeremd met behulp van een sliptouwetje.

- 1 Laat het gewicht over een afstand van 1 meter vallen (gebruik de tijd gedurende het vallen over de eerste meter voor het instellen van de slipkracht van het sliptouwetje zodanig dat de omwentelingsnelheid constant is en een bepaalde waarde heeft).
 - 2 Bepaal het rendement van dit *dynamo-elektromotorsysteem* bij de volgende draaisnelheden van de elektromotor: 10, 20, 30, 40 en 50 omw/s.
- Welke conclusie trek je uit deze proef?



Bij dit onderzoek probeer je aan te tonen dat *alle* arbeid die een wrijvingskracht verricht, wordt omgezet in warmte.

Lees voordat je met dit onderzoek begint eerst de instructie 'arbeid meten met behulp van een sleeprol' op blz. 52.



Je hebt een koperen cilinder van ongeveer 100 gram. Er zit (via een warmte-isolerend gedeelte) een handle aan de cilinder. Om de cilinder is een koord gewonden dat aan de ene kant is verbonden met een veerunster.

Aan de andere kant van het koord hangt een gewicht van bijvoorbeeld 10 N.

In de cilinder is een gevoelige thermometer ($-10\text{ }^{\circ}\text{C} \rightarrow 30\text{ }^{\circ}\text{C}$) bevestigd (voorzichtig!).

- 1 Lees de thermometer af.
- 2 Draai de handle nu zó snel rond, dat de veerunster op 0 komt te staan. Dan zal de totale wrijvingskracht tussen koord en cilinder precies gelijk zijn aan het gewicht dat aan het koord hangt. Maak zo 100 slagen.
- 3 Wacht even en lees de thermometer af.

- Bereken nu:
 - hoeveel joule warmte er nodig was om deze koperen cilinder deze temperatuurstijging te geven (daarvoor moet je even de soortelijke warmte van koper opzoeken)
 - hoeveel joule arbeid door het ronddraaien (100 slagen) is geleverd
- Vergelijk de uitkomsten met elkaar. Als het goed is, moeten ze gelijk zijn.*

* Wil je de proef nauwkeurig uitvoeren, dan zijn er een paar mogelijkheden:

- je kunt meer slagen maken
- je kunt starten bij een paar graden onder kamertemperatuur (op tafelhoogte!) en eindigen bij een paar graden erboven. Dan heeft de cilinder eerst wat warmte uit de omgeving opgenomen en later weer een beetje afgestaan. En die hoeveelheden compenseren elkaar ongeveer.

Bij dit onderzoek probeer je aan te tonen dat de gravitatie-energie van een voorwerp na het vallen geheel is omgezet in warmte.

Neem een stevige kartonnen koker of plastic buis van 1 m lengte (doorsnede bijv. 8 cm). Sluit hem aan beide zijden af met een kurk of rubberstop. Doorboor een van de kurken, zodat er een nauwkeurige thermometer (bijv. $-10^{\circ}\text{C} \rightarrow 30^{\circ}\text{C}$) in gestoken kan worden. Vul de koker met 1 kg fijne loodhagel en sluit hem goed af.

Als je de buis (vanuit verticale stand) snel omkeert, dan zal de zwaartekracht arbeid verrichten op de loodhagel. De loodhagel raakt zijn gravitatie-energie kwijt. Dat merk je door de temperatuurstijging van het lood in de buis, want die gravitatie-energie wordt omgezet in warmte.



Meet de temperatuurstijging die de thermometer aangeeft als je de buis (in verticale stand) 100 maal snel omkeert (pas op dat je de thermometer niet breekt!).

- Bereken nu:
 - hoeveel joule gravitatie-energie het lood is kwijtgeraakt bij 100 maal vallen
 - de warmte die nodig is om het lood de gemeten temperatuurstijging te geven (daarvoor moet je even de soortelijke warmte van lood opzoeken)
- Vergelijk de verloren gegane gravitatie-energie met de opgeleverde warmte. Waardoor kunnen eventuele verschillen veroorzaakt worden?

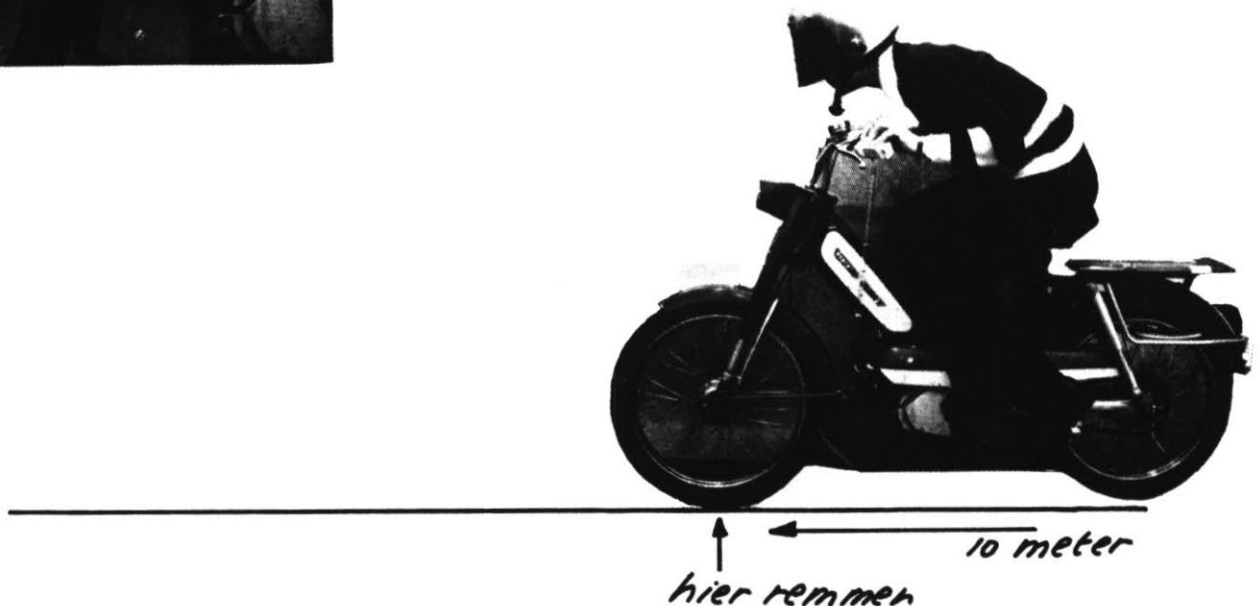
het rendement van een bromfietsmotor

Bij dit onderzoek bepaal je het rendement van een bromfietsmotor en je onderzoekt of dit rendement afhangt van de belasting van de motor.



Voor deze proef moeten enkele kleine voorzieningen op de bromfiets aangebracht worden.

De remkracht die je met de remknijper uitoefent, moet niet te groot zijn. Als je een blokje op het handvat van het stuur plakt, kan je er voor zorgen dat je de remknijper niet helemaal inknipt (vergelijk het thema *Verkeer en veiligheid*).



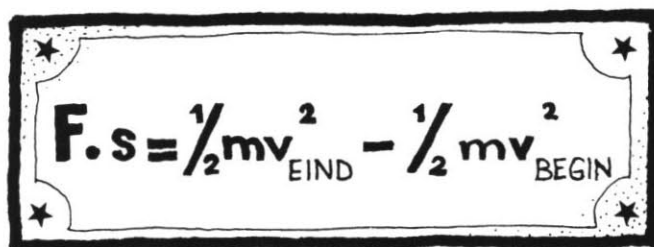
het rendement van een bromfietsmotor

PROEF 1 remkracht bepalen

Zet op een rustige rechte straat een stuk van 10 meter uit. Laat de brommer met constante snelheid (ongeveer 30 km/h) komen aanrijden. Meet de snelheid op het stuk van 10 meter en rem de brommer aan het eind van het stuk af (gas terugnemen natuurlijk).

Meet de remweg.

Uit deze gegevens kun je gemiddelde remkracht uitrekenen met de formule (uit *Verkeer en veiligheid*):


$$F \cdot s = \frac{1}{2} m v_{\text{EIND}}^2 - \frac{1}{2} m v_{\text{BEGIN}}^2$$

De remkracht F_{rem} heb je zo dadelijk weer nodig in de derde proef.

Opmerkingen

$v_{\text{eind}} = 0$, want dan staat de brommer stil.

m is de massa van brommer plus berijder.

Het meten van de snelheid van de brommer kan op twee manieren:

- gewoon op de snelheidsmeter kijken (en omrekenen in m/s)
- met een stopwatch de tijd meten die de brommer over het afleggen van de 10 m doet en dan de snelheid uitrekenen

PROEF 2 weerstandskracht bepalen

Herhaal nu proef 1, maar rem aan het eind van de tien meter *niet af*.

Neem alléén gas terug en laat de brommer uitlopen.

Meet opnieuw de remweg.

Bereken uit deze proef de gemiddelde weerstandskracht F_w die wordt veroorzaakt door wrijving in de motor, de overbrenging en de assen en door de luchtweerstand.

Ook deze kracht F_w moet je in de derde proef weer gebruiken.

het rendement van een bromfietsmotor

PROEF 3 het rendement van de brommermotor

De bedoeling van deze proef is dat je erachter komt, hoe groot het rendement van de brommermotor is bij een verschillende belasting.



Voor deze proef is weer een kleine wijziging van de brommer nodig.

Let op: het aanbrengen van deze voorziening is niet geheel ongevaarlijk!

Maak het slangetje dat naar de benzinetank gaat los en verbind het met een plastic buis met maatverdeling. Vul de buis met benzine. Dan kun je zien hoeveel er is verbruikt.

- 1 Zet een parcours van 500 m uit.
Rij nu het parcours met een snelheid van ongeveer 15 km/h.

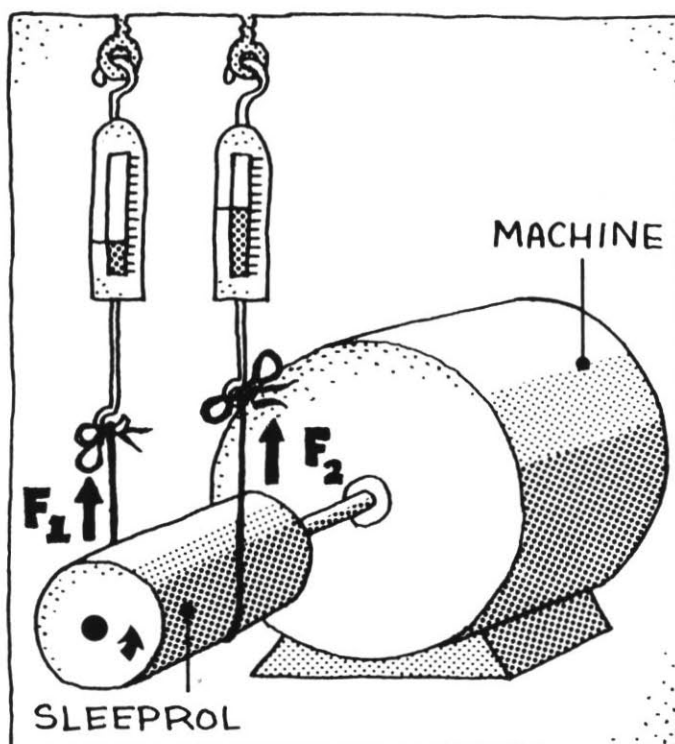
Bepaal de hoeveelheid verbruikte benzine.
 - Bereken daaruit hoeveel joule energie het rijden heeft gekost. De verbrandingswarmte van brommerbenzine is $33 \times 10^9 \text{ J/m}^3$.
Je weet ook de gemiddelde weerstandskracht F_w op de brommer (proef 2).
Bereken uit deze gegevens hoe groot het rendement van de brommer is in dit geval.
- 2 Rij het parcours nog eens, maar nu met aangetrokken rem (zelfde snelheid).
 - Bepaal het rendement in dit geval (gebruik bij je berekening F_{rem} uit proef 1).
 - Welke conclusie trek je uit dit onderzoek?

arbeid meten met behulp van een sleeprol

INSTRUCTIE

In deze instructie leer je een nieuwe manier voor het meten van de arbeid die een machine verricht. Deze manier van meten zul je bij een aantal vervolgonderzoeken moeten gebruiken.

Machines verrichten vaak hun arbeid in een draaiende beweging. De manier om die arbeid te meten beschrijven we hier.

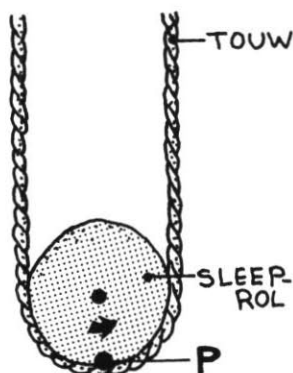


Aan de as van de machine wordt een rol, de sleeprol (of poelie), bevestigd. Over die sleeprol gaat een koord dat aan beide kanten vastzit aan een krachtmeter (veerunster). Laten we de machine draaien en trekken we de unsters naar boven, dan wordt de sleeprol belast met een wrijvingskracht. Die wrijvingskracht werkt de draaiing tegen. Als we harder trekken moet de machine meer arbeid verrichten om het toerental constant te houden. Als we minder hard trekken, levert de machine minder arbeid bij hetzelfde toerental.

De volgende tekst is bedoeld om je de krachten die bij die sleeprol een rol spelen te laten verkennen.

Krachten bij een sleeprol

Deze tekening geeft een doorsnede van de sleeprol weer op de plaats waar het touwtje eromheen ligt. Als de rol in de aangegeven richting draait, sleept hij langs het touw, dat zich als het ware verzet. Dan oefent de rol een wrijvingskracht uit op het touw langs het hele oppervlak waar hij langs sleept. En het touw oefent dan een net zo grote tegengestelde kracht uit op de rol. Dat is te voelen doordat je aan de ene kant van het touw harder moet trekken dan aan de andere kant.



arbeid meten met behulp van een sleeprol

- Geef eens aan aan welke kant je harder moet trekken.
Stel het nu eens voor *alsof* alle krachten alleen maar in punt P zouden werken.
- Geef in punt P de richting van twee krachten aan:
 - de kracht F_R van de rol op het touw
 - de kracht F_T van het touw op de rolDe kracht van het touw op de rol (F_T) is gelijk aan het verschil tussen de krachten waarmee je links en rechts moet trekken (F_1 en F_2).
- Geef de krachten waarmee je links en rechts moet trekken aan met pijlen in de tekening (grootste pijl bij de grootste kracht).

Algemeen geldt dus: $F_T = F_R = F_1 - F_2$ (als je met F_1 de grootste kracht aangeeft).

De afstand langs de sleeprol

Neem eens aan dat de machine 2 minuten heeft gedraaid. Neem ook aan dat de omwentelingssnelheid 600 omwentelingen per minuut was.

- Hoeveel omwentelingen heeft de rol in die 2 minuten gemaakt?
Neem ook aan dat de omtrek van de rol 6 cm was.
- Over welke afstand (in meter) heeft de rol dan langs het touw gesleept?

Arbeid berekenen

Je hebt nu gezien hoe je de kracht kunt meten die de sleeprol op het touw uitoefent. Je kunt ook de afstand bepalen waarover de rol langs het touw sleept. Als je kracht en afstand weet, kan je de arbeid berekenen die de machine verricht.

Een rekenvoorbeeld

Gegevens:

- diameter sleeprol 4 mm
- $F_1 = 0,60$ N
- $F_2 = 0,45$ N
- de sleeprol maakt 100 omwentelingen.

Berekening van de kracht:

$$F = F_1 - F_2 = 0,15 \text{ N}$$

Berekening van de afstand:

Diameter sleeprol: 4 mm = 0,004 m, dus straal sleeprol: 0,002 m

Omtrek sleeprol:

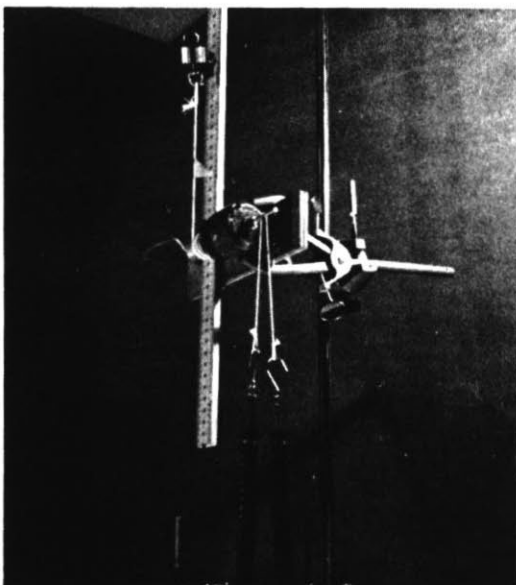
$$2\pi r = 6,3 \times 0,002 \text{ m} = 0,0126 \text{ m}$$

Afstand waarover de kracht heeft gewerkt:

$$s = 100 \text{ (omw)} \times 0,0126 \text{ m} = 1,26 \text{ m}$$

De arbeid is dus:

$$W = Fs = 0,15 \text{ N} \times 1,26 \text{ m} = 0,19 \text{ J}$$



inhoud

1	Energieverlies?	blz. 57
2	De wet van behoud van energie	blz. 61
3	James Prescott Joule	blz. 65
4	Machines en energiebehoud	blz. 67
5	De OTEC-centrale, tóch een perpetuum mobile?	blz. 69

Wat nu volgt, is met geen enkele proef fatsoenlijk aan te tonen. We kunnen alleen aannemelijk maken dat het zo is door op een aantal dingen te wijzen.



De snelheid van een vallend voorwerp bepalen met een stroboscopische foto

Je zou kunnen beginnen met een voorbeeld te nemen van een energieomzetting die vrijwel volledig is, nl. een vallend voorwerp. Dat vallend voorwerp heeft op een zekere hoogte een gravitatie-energie:

$$E = m \cdot g \cdot h$$

Die gravitatie-energie kan je dus uitrekenen. En als het voorwerp dan naar beneden valt, wordt die gravitatie-energie omgezet in bewegingsenergie:

$$E = \frac{1}{2} m v^2$$

Als het voorwerp beneden is aangekomen, is het al zijn gravitatie-energie kwijtgeraakt. Door de snelheid te bepalen waarmee het voorwerp de grond raakt, kan je uitrekenen hoeveel bewegingsenergie dat voorwerp heeft op het moment van botsing met de grond.

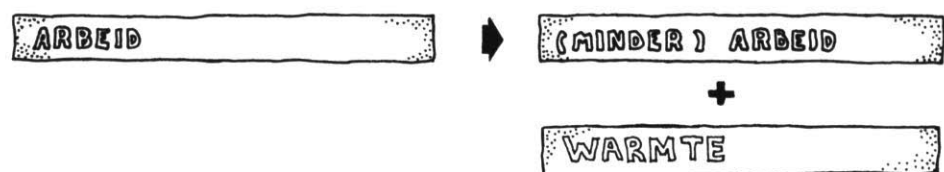
Deze metingen en berekeningen leveren het volgende resultaat op: *alle* gravitatie-energie wordt omgezet in bewegingsenergie. Er gaat geen energie verloren. Op zichzelf zegt dit natuurlijk niets: zo'n bal is tenslotte geen machine. Laten we daarom nog eens een paar voorbeelden pakken.

1 De versnellingsbak

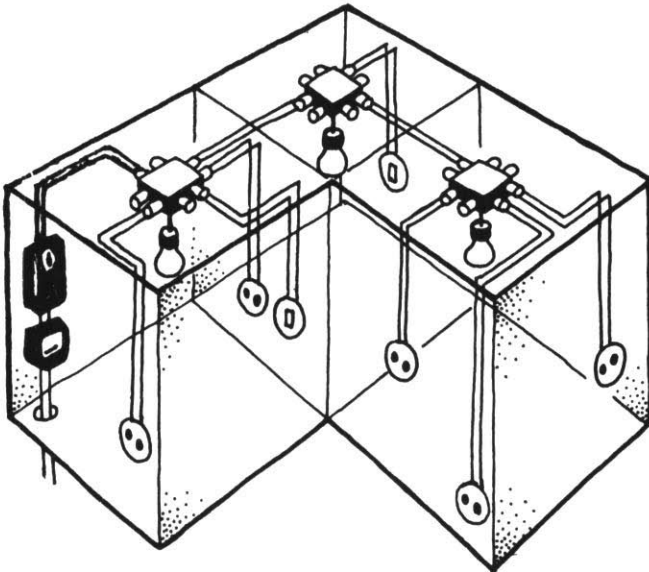
De versnellingsbak (hoofdstuk 2) vertoonde 'verlies van arbeid'.

Nu kun je je wel voorstellen dat de tandwielen en de assen in zo'n versnellingsbak last hebben van wrijving. Maar bij wrijving wordt warmte geproduceerd. Het is dus best aan te nemen dat het verlies omgezet wordt in warmte (misschien heb je die warmte wel kunnen voelen!).

In dat geval kun je dus zeggen:



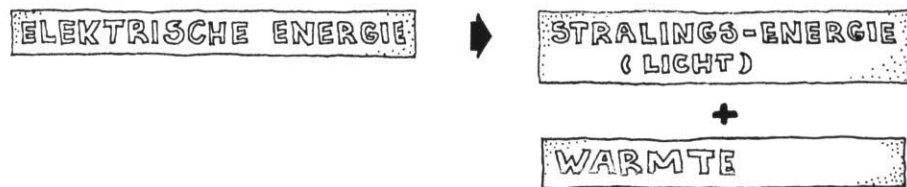
energieverlies?



2 Energie in huis

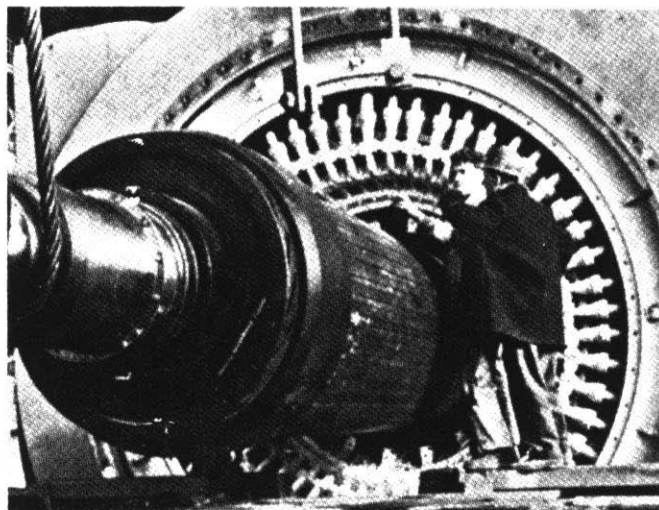
De elektrische energie die ons huis binnenkomt, wordt onder andere gebruikt voor verlichting. In een gloeilamp wordt echter maar een klein gedeelte van de toegevoerde elektrische energie omgezet in licht.

Een ander gedeelte wordt omgezet in warmte. Als je in staat zou zijn om alle hoeveelheden energie te meten, dan zou je blijken dat precies *alle* elektrische energie die in de lamp wordt gebruikt, wordt omgezet in andere vormen. Dus:



3 Elektriciteitsproductie in een centrale

De elektrische centrale produceert elektrische energie door middel van heel grote dynamo's: generatoren. Daarvoor wordt olie, aardgas of kernenergie gebruikt.



energieverlies?

De warmte die dat oplevert, wordt opgeslagen in hete stoom. Die stoom zet turbines in beweging en die houden op hun beurt de dynamo's draaiende. Een flink deel van de geproduceerde warmte verdwijnt echter in de schoorstenen, koelinstallaties en in de warmte die in de generatoren wordt ontwikkeld.

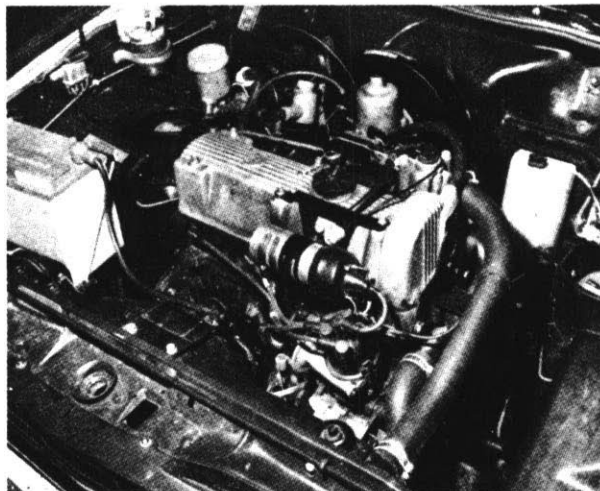
Door het elektriciteitsnet wordt de elektrische energie naar de verbruikers getransporteerd. Ook bij dat transport gaat energie verloren door warmteontwikkeling.

In de huizen, fabrieken en kantoren gebruiken wij de rest om arbeid mee te verrichten (met elektromotoren, dus bijvoorbeeld de koffiemolen en de stofzuiger), voor verlichting en voor verwarming en/of koeling (de koelkast).

4 Benzinemotoren

De verbranding van benzine levert warmte. Die warmte wordt voor verschillende doeleinden gebruikt.

Een gedeelte van die warmte laat het verbrandingsgas uitzetten, en daardoor de zuigers bewegen. Die beweging wordt omgezet in een beweging van de auto.



Een klein gedeelte wordt via de dynamo omgezet in elektrische energie om de accu op te laden. Die levert op zijn beurt weer stroom voor verlichting, de ventilatie én de ontsteking van de motor. Een deel van de warmte wordt in de winter gebruikt voor de verwarming van de auto.

En tenslotte wordt een groot gedeelte van de warmte direct via het koelsysteem afgevoerd naar de buitenlucht.

RENDEMENT

In alle vier hiervoor beschreven gevallen kan je zien, dat van *alle* gebruikte energie netjes aan te tonen is waar die blijft. Toch is altijd slechts een gedeelte van die energie ons van werkelijk nut. De rest 'gaat verloren', dat wil zeggen kan door ons niet nuttig gebruikt worden.

energieverlies?

De energie die een motor ingaat, wordt voor veel méér gebruikt dan alleen voor het leveren van arbeid. Een elektromotor wordt warm, dus een gedeelte van de energie wordt gebruikt voor warmteproductie. Voor een verbrandingsmotor is dat deel nog veel groter: zéér veel energie wordt daarin omgezet in warmte. In een auto wordt de energie ook niet alleen gebruikt voor het leveren van arbeid, want de warmte kan gebruikt worden voor verwarming ('s winters) en er wordt ook energie gebruikt voor het opwekken van elektriciteit voor verlichting, achterrautverwarming en ventilatoren. Daarom is het rendement meer algemeen:

$$\text{rendement} = \frac{\text{nuttig gebruikte energie}}{\text{totaal gebruikte energie}} \times 100\%$$

En wat 'nuttig' is, maken we zelf uit.

SAMENVATTING

We kunnen zeggen dat nog nooit is aangetoond dat er werkelijk energie verloren ging. Er geldt dus een algemene natuurwet:

Bij alle energieomzettingen is precies aan te wijzen waar de energie die wordt gebruikt in wordt omgezet. De totale hoeveelheid energie die wordt gebruikt, is volledig terug te vinden in de vormen waarin zij is omgezet.

Je kunt het ook heel kort zeggen

Energie gaat nooit verloren.

Deze wet heet: *De wet van behoud van energie.*

Het blijft natuurlijk de vraag of er niet werkelijk energie verloren gaat. Met die vraag hebben zich vroeger veel geleerden bezig gehouden. Daarover kun je meer vinden in de leesteksten 2 en 3.

de wet van behoud van energie

Overgenomen uit het Teleac-cursusboek *Natuurkunde is overal*.

In 1840 voer de arts Julius Robert Mayer aan boord van de schoener *Java* van Rotterdam naar Oost-Indië. Toen het schip daar aankwam, waren 38 bemanningsleden ziek. De normale behandeling in die tijd was een aderlating. Het viel Mayer op dat het bloed daar veel roder was dan in Holland, het leek veel meer op bloed dat door de slagaders vloeit en dus nog erg zuurstofrijk is. Het scheen dat in de tropische omgeving het menselijk lichaam minder zuurstof verbruikt dan in koudere streken. Een tijdgenoot van Mayer had al gesteld dat het verbruik van voedsel om het lichaam op temperatuur te houden in warmere streken minder is dan in een koudere omgeving.

Mayer ging nog een stap verder en poneerde dat het verbruik van voedsel precies in evenwicht was met een combinatie van twee factoren. De eerste factor was de warmte die het lichaam kwijtraakte aan de omgeving, de tweede was de arbeid die door het lichaam werd verricht. Mayer vond, evenals zijn tijdgenoot Joule, warmte en arbeid slechts verschillende gelijkwaardige vormen van energie. Hij schreef in een artikel dat in 1842 verscheen: 'Als energie er eenmaal is, dan kan ze niet wat de hoeveelheid betreft veranderen. Energie kan op zijn hoogst van vorm veranderen'. Dit is een van de eerste formuleringen van wat tegenwoordig bekend staat als de eerste wet van de warmteleer. James Prescott Joule had omstreeks dezelfde tijd een kwantitatief verband gevonden tussen warmte en arbeid.



Von Helmholtz

De derde man, die een belangrijke bijdrage leverde, was Hermann von Helmholtz die in 1847 de internationale wetenschappelijke gemeenschap ervan overtuigde dat de eerste wet een betrouwbare generalisatie was. Hij stelde dat machines die eeuwig zouden kunnen blijven doorwerken (perpetuum mobiles) volgens een axioma onmogelijk waren.

We onderscheiden in de natuurkunde evenals in de wiskunde axioma's en theorema's. Een theorema is een conclusie, die logisch volgt uit een axioma, dat daarentegen geen logisch bewijs vereist. De betrouwbaarheid van een natuurkundig axioma kan worden gebaseerd op herhaalde natuurkundige waarnemingen. Von Helmholtz hoefde dus niets te bewijzen, het was voldoende om aan te geven dat tot op dat moment niemand erin was geslaagd een succesvolle perpetuum mobile te bouwen. En dat is op dit moment nog steeds waar.

Perpetuum mobile

Uit het feit dat het nog steeds niet gelukt is een perpetuum mobile te bouwen blijkt kennelijk dat de hoeveelheid energie niet groter kan worden. Er blijven nog twee mogelijkheden over: óf de energie blijft gelijk óf de energie neemt af. In een onnoemelijk aantal experimenten is uiterst nauwkeurig gemeten en gezocht naar energieverliezen, die niet konden worden verklaard. Tot nog toe vergeefs. Er blijft dan nog maar één mogelijkheid over: de totale hoeveelheid energie blijft gelijk, alleen de vorm kan veranderen. Laten we eens enkele perpetuum mobile-voorstellen bekijken.

Een van de eerste voorstellen werd gedaan in 1618 door Robert Fludd. Hij stelde een molen voor die niet alleen een molensteen zou laten draaien, maar daarnaast ook nog zou zorgen dat het water waarmee het schoepenrad in beweging werd gehouden, opnieuw kon worden gebruikt (fig. a).

de wet van behoud van energie

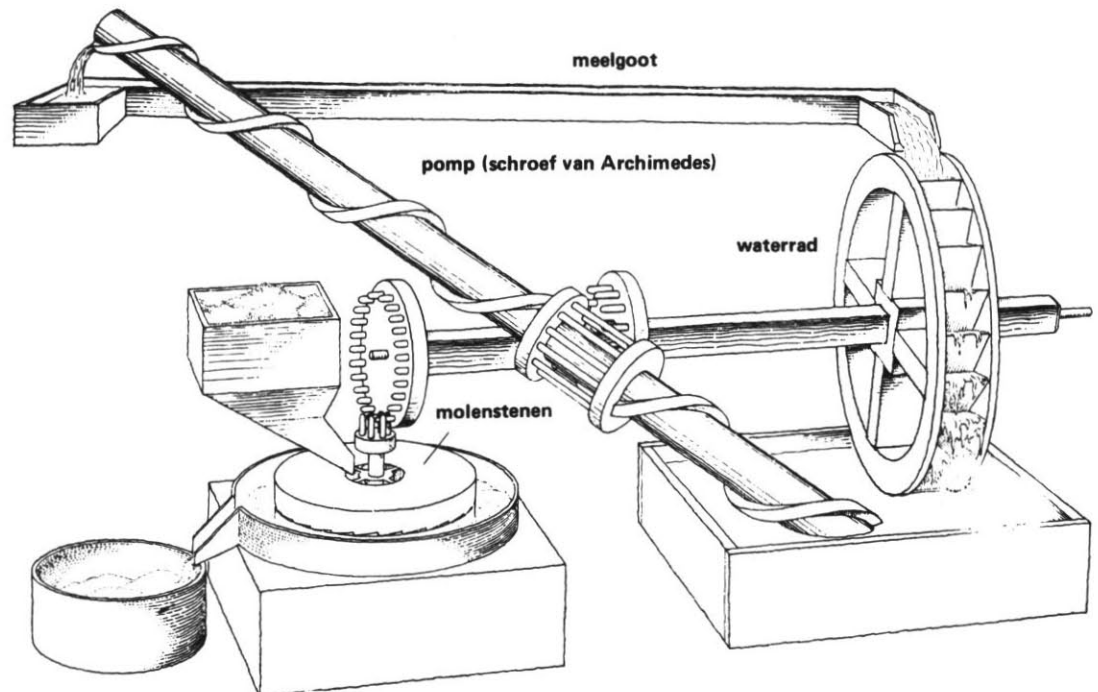


Fig. a De molen van Robert Fludd

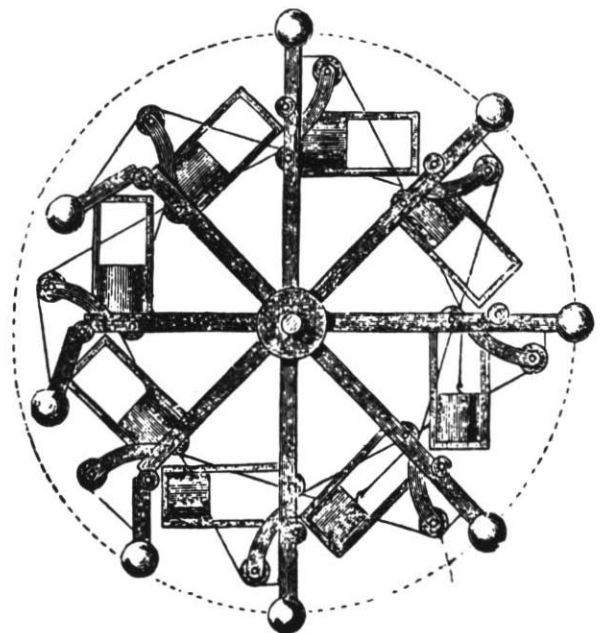
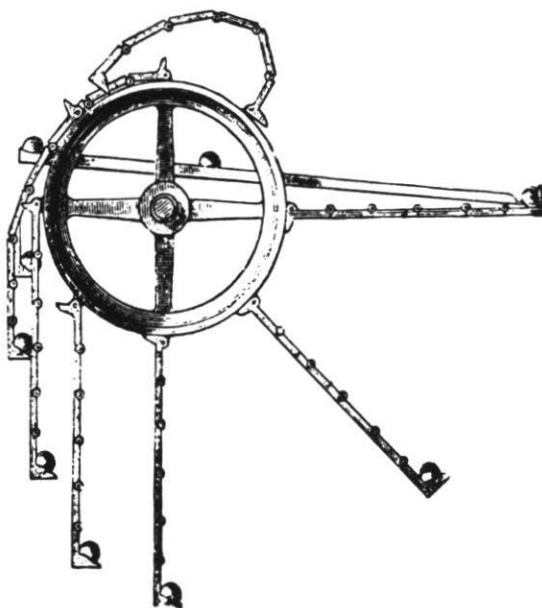


Fig. b en c Perpetuum mobiles waarbij de gewichten bij het omlaaggaan verder van de as afzitten dan bij het omhooggaan. Ze draaien dus beide rechtsom

Een ander type (fig. b en c) waarmee vele proeven zijn gedaan, is een verticaal draaiend wiel, waarbij gewichten bij het omlaag gaan verder van de draaiingsas afzitten dan wanneer ze omhoog gaan. Het idee is dat bij het omlaag gaan van een gewicht het produkt 'kracht x arm' groter is dan bij het naar boven gaan.

de wet van behoud van energie

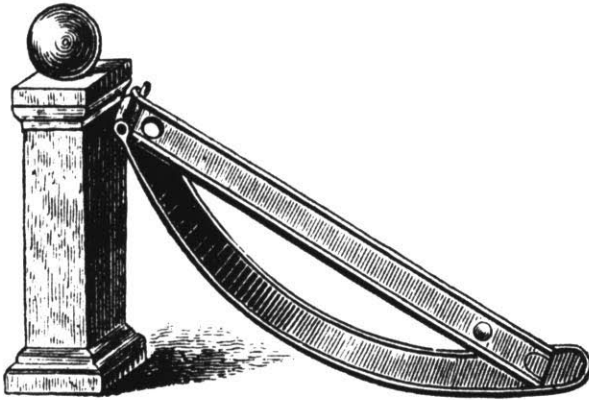


Fig. d Een perpetuum mobile dat op magnetisme werkt

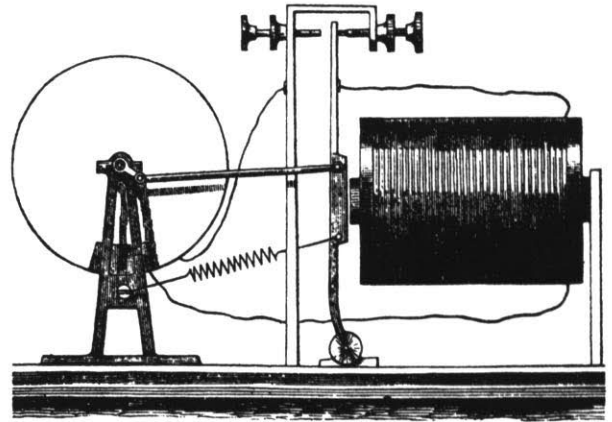


Fig. e Een perpetuum mobile dat op elektriciteit werkt

Al deze voorbeelden zouden moeten functioneren met behulp van de zwaartekracht. Andere krachten die bij het maken van een perpetuum mobile te hulp werden geroepen, zijn de magnetische en de elektrische. Een voorbeeld van zo'n magnetisch perpetuum mobile is een toestel (fig. d) waarbij een ijzeren bal langs een hellend vlak omhoog wordt getrokken door een magneet op een paal. Juist voordat de bal de magneet bereikt, valt hij door een gat en rolt snel een ander hol vlak af en komt dan weer op de eerste helling terecht, waar de kringloop van voor af aan begint. Nog een model van een perpetuum mobile (fig. e) is de opstelling waarbij een elektromagneet een plaat aantrekt. Via een as is deze plaat met een wiel verbonden. Als het wiel draait, kan het via een soort dynamo elektriciteit opwekken, die dan weer wordt gebruikt om de elektromagneet te voeden. Zoals gewoonlijk verwaarloosde de uitvinder de verliezen door wrijving en weerstand. Er zijn ook perpetuum mobiles geweest die schijnbaar wel werkten.

Gesloten systeem

Om de formulering van de wet van behoud van energie wat preciezer te maken moeten we nog toevoegen dat deze slechts waar is, als men van buiten af geen energie toevoegt. Dit wordt in de natuurkunde als volgt geformuleerd: de wet van behoud van energie geldt voor een gesloten systeem. Een gesloten systeem kan dus *de laatste opstelling zijn zonder de luchtstroom*, maar dan moet ook worden voorkomen dat er warmte naar buiten wordt afgegeven of via straling naar binnen komt. Het grootst mogelijk denkbare gesloten systeem is het heelal. Er is in het heelal een bepaalde hoeveelheid energie die eventueel nog kan worden omgezet in andere vormen. De totale hoeveelheid blijft gelijk. Ook de zon die enorme hoeveelheden energie produceert kan dit op de lange duur niet straffeloos doen. Nu moet niemand denken dat over een aantal jaren de zon 'uit' gaat. De voorraad ter plaatse is nog wel zo groot dat de produktie miljarden jaren op deze voet kan doorgaan.



Het perpetuum mobile dat in deze televisieles wordt gedemonstreerd. Rechts de uitvinder in gesprek met Joop van Dalen

de wet van behoud van energie

De rol van de wet van behoud van energie

Al meer dan een eeuw wordt de wet van behoud van energie beschouwd als een van de meest fundamentele wetten die de natuurkunde kent. Het is als het ware een gemeenschappelijke noemer waarin elektriciteit, magnetisme, gravitatie, structuur van atomen en de samenstelling van atoomkernen een rol spelen. Deze wet geldt bovendien niet alleen in de natuurkunde, maar ook in de scheikunde en biologie, evenals in de technische wetenschappen. Geen enkele andere wet geeft aan zoveel verschillende wetenschappelijke gebieden een gemeenschappelijk uitgangspunt.

Het woordje 'wet' moet hier niet worden verstaan in de betekenis die de rechtspraak eraan toekent. Een rechtspraakwet geeft namelijk regels waaraan iedereen zich moet houden. Een wet in de natuurkundige betekenis geeft een regel waarvan de natuurkundigen geloven dat hij zal blijven gelden, ook in nieuwe nog nooit uitgevoerde experimenten. Het vertrouwen in deze wet is zó sterk, dat wanneer er bij een experiment in een systeem energie schijnt te ontstaan of lijkt te verdwijnen, de natuurkundigen eerder denken te maken te hebben met een tot nu toe onbekende vorm van energie dan dat ze echt serieus menen dat de wet van behoud van energie niet zou gelden.

Een voorbeeld waarin dit vertrouwen wordt gedemonstreerd is de ontdekking van een kerndeeltje, het 'neutrino', door W. Pauli in 1933. Experimenten lieten zien dat er bij bepaalde kernreacties energie verdween, maar Pauli stelde voor dit te verklaren door aan te nemen dat er een klein deeltje — het neutrino — werd gevormd dat ongemerkt een beetje energie meenam. De natuurkundigen hebben meer dan twintig jaar in het neutrino geloofd, ondanks het feit dat deze deeltjes niet experimenteel konden worden aangetoond. Tenslotte zijn neutrino's in 1956 in een gecompliceerd experiment aangetoond. Bij dit experiment werd gebruik gemaakt van een kernreactor, een apparaat dat in 1933 nog niet bestond. Het thema van behoud is zó sterk, dat we geloven dat dit altijd het geval zal zijn. Elke uitzondering zal vroeger of later zijn te verklaren op een manier waarbij de wet blijft gelden. In het ergste geval zullen we nieuwe vormen van energie moeten invoeren. Het enige wat daarmee zal worden bereikt, is dat de wet nog algemener geldt en nog sterker wordt.



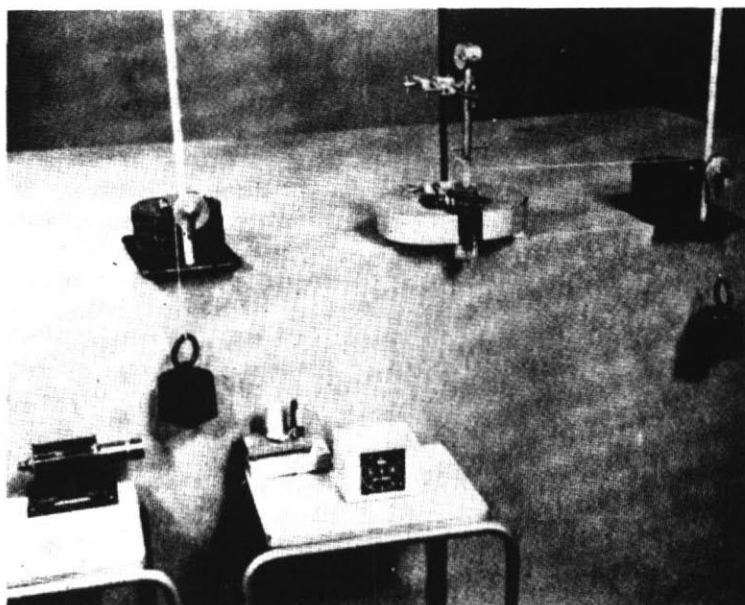
Wolfgang Pauli (1900-1958)

De proeven van James Prescott Joule (1819-1898) (de eenheid 'joule' is naar hem genoemd) toonden aan, dat elke keer dat er energie werd omgezet, de hele hoeveelheid terug te vinden was in een andere vorm of in warmte.

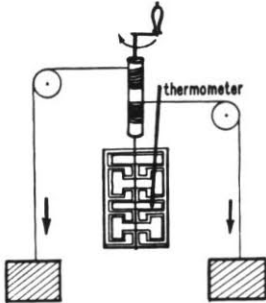
De leestekst over Joule is overgenomen uit: Jardine, *Natuurkunde ... Doen*, deel 3 h/v, blz. 38 en verder.

James P. Joule, een bierbrouwer uit Manchester, werkte in dezelfde tijd als Mayer. Evenals Mayer was hij geen natuurkundige van professie, en beiden kwamen tot dezelfde conclusie. Daarmee houdt echter de overeenkomst op. In plaats van met de vage, pseudo-wetenschappelijke bewijzen van Mayer kwam Joule met de resultaten van veertig jaar uiterst nauwkeurig onderzoek. Gedurende die tijd ontwierp, bouwde en gebruikte hij de meest ingewikkelde en nauwkeurige toestellen die ooit bedacht zijn om het verband tussen mechanische arbeid en warmte te onderzoeken. Als we al aan Mayer de formulering van de theorie te danken hebben, dan komt Joule de eer toe aangetoond te hebben dat deze theorie het in de praktijk 'deed'.

Toen hij 19 was bouwde Joule een elektromotor en mat hij de hoeveelheid energie die in een bepaalde tijd verbruikt werd, alsmede de energie die in dezelfde tijd door de motor geleverd werd. Hij was erg benieuwd of zo'n motor een stoommachine kon vervangen. Tot zijn teleurstelling ontdekte hij dat een kilogram zink in de batterij de elektromotor in staat stelde evenveel arbeid te verrichten als geleverd werd door 0,2 kilogram steenkool in een stoommachine. Hij bouwde vervolgens een dynamo en ontdekte dat elektrische stroom warmte ontwikkelde als hij de dynamo liet draaien. Zou hij deze warmte kunnen meten? Hij besloot de spoel van de dynamo in water te dompelen en de temperatuurverandering die optrad als er aan de dynamo gedraaid werd, te noteren. In de onderstaande figuur is een reconstructie (met moderne instrumenten en methoden) van Joule's proef afgebeeld.



james prescott joule



Nadat hij eenmaal ontdekt had dat, elektrisch, altijd dezelfde hoeveelheid warmte geproduceerd werd door dezelfde hoeveelheid mechanische energie, was Joule van mening dat het ook mogelijk moest zijn mechanische energie *direct* om te zetten in warmte, zonder tussenkomst van elektriciteit. Hij probeerde allerlei manieren, maar kwam tenslotte uit bij zijn beroemde schoepenrad (zie de figuur hiernaast).

Om de ingebrachte mechanische energie te bepalen gebruikte hij dezelfde methode als bij vroegere proeven (met constante snelheid vallende gewichten). Hij mat verder de temperatuur van het water vóór en na het roeren. Als je denkt dat dit een gemakkelijke proef is moet je het maar eens proberen! Als je het zonder de nodige voorzorgsmaatregelen doet, loop je de kans dat de eindtemperatuur *lager* is dan de begintemperatuur! *Weet je hier een verklaring voor?*

Joule's enthousiasme voor zijn onderzoeken was zo groot, dat hij op zijn huwelijksreis naar Zwitserland een thermometer meenam. Lord Kelvin (ook een wereldberoemde natuurkundige) vertelt dat hij hem tijdens deze huwelijksreis ontmoette terwijl hij bezig was de temperatuur van het water bovenaan en onderaan een grote waterval te meten (Zie nevenstaande figuur). *Waar verwacht je de hoogste temperatuur: onderaan of bovenaan de waterval? Waarom?*



Potentiële energie is hetzelfde als gravitatie-energie

Bij zijn proeven gebruikte Joule elektromotoren, dynamo's en schoepenraden. Hij onderzocht ook het samenpersen van gassen en het verlies van potentiële energie wanneer een lichaam onder invloed van de zwaartekracht valt. Hij was ervan overtuigd dat er in al die gevallen *dezelfde* relatie bestond tussen de verrichte mechanische arbeid en de geproduceerde warmte. Zijn metingen waren zo nauwkeurig, dat je verwacht zou hebben dat de natuurkundigen van die dagen ze geaccepteerd zouden hebben. Maar dat was niet zo. Jarenlang heeft hij moeten overreden en steeds nieuwe resultaten publiceren voor men er enige notitie van nam. Men zei dat ze hem niet geloofden omdat hij niets had dan een paar hondersten van graden om te bewijzen dat hij gelijk had. Toen de Royal Society eens weigerde één van zijn artikelen te publiceren sprong hij niet uit het raam, zijn gevoel voor humor bewaarde hem ervoor. Hij zei dat hij zich voor kon stellen dat de Londense heren op hun vergadering gezegd zouden hebben: 'Wat goeds kan er voortkomen uit een stad (Manchester) waar ze de warme maaltijd midden op de dag gebruiken!' Misschien is het vermogen om zo'n antwoord te geven wél zo belangrijk als het vermogen om de eerste Hoofdwet van de Thermodynamica te verifiëren!

Pas 30 jaar nadat hij de verslagen van zijn eerste proeven publiceerde kreeg Joule de Copley-medaille van de Royal Society. Dit was één jaar voor Mayer deze onderscheiding kreeg.

machines en energiebehoud

Met de wet van behoud van energie zijn we in staat om zeer veel processen te begrijpen en na te gaan waar de energie blijft. Hieronder staan een aantal voorbeelden om dat toe te lichten.

Energie in huis: de verwarming

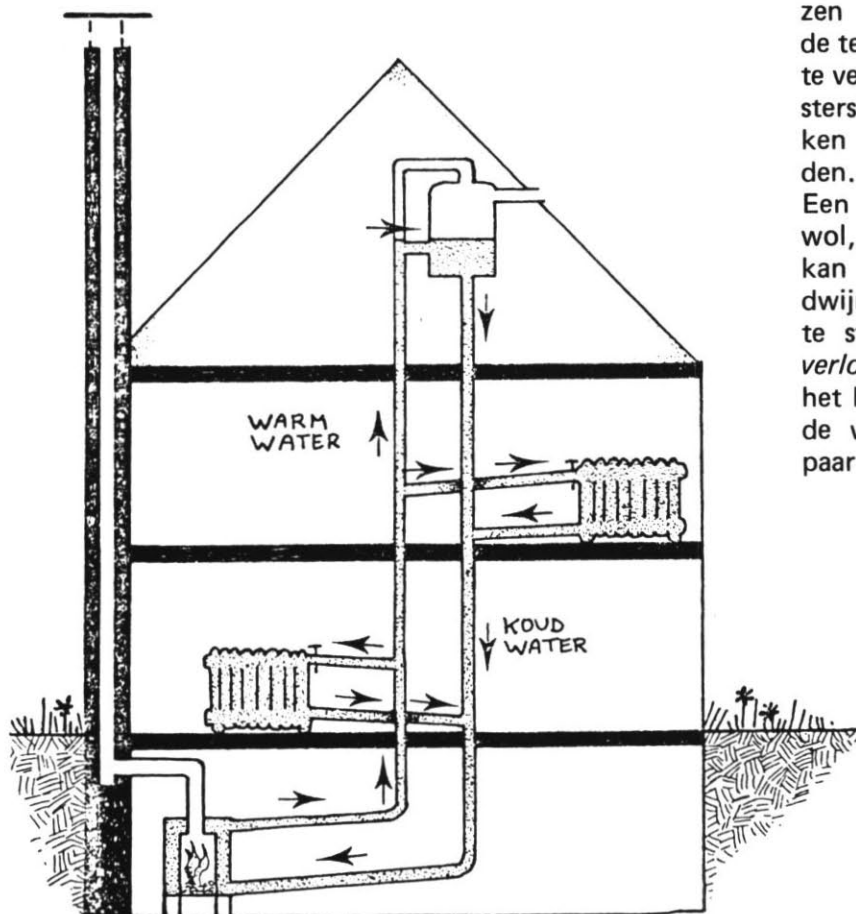
De centrale-verwarmingsketel wordt gestookt met aardgas.

Elke m^3 aardgas levert bij verbranding een hoeveelheid warmte.

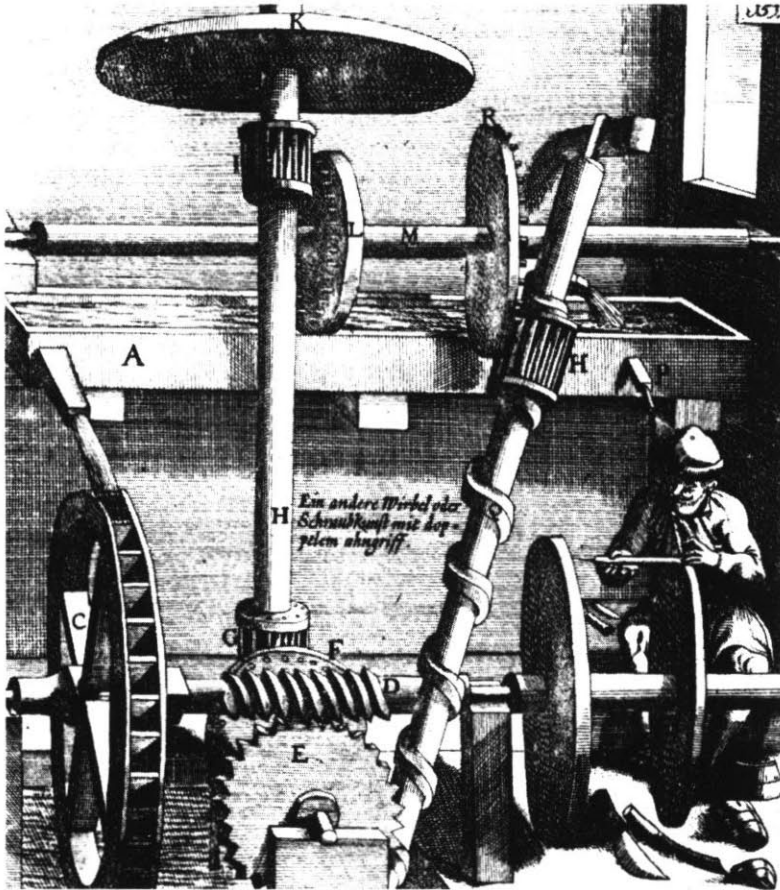
Een gedeelte van die warmte gaat meteen via de schoorsteen het huis uit. De rest wordt voorlopig opgeslagen in het water van het c.v.-systeem.

Dat water staat de warmte af in de buizen en de radiatoren. Daardoor stijgt de temperatuur van de kamers. De warmte verdwijnt weer door de muren, de vensters, enz. Daarom moet je blijven stoken om de temperatuur op peil te houden.

Een goede isolatie (dubbele ramen, glaswol, schuimvulling in de spouwmuur) kan zorgen dat er minder warmte verdwijnt en dat je dus minder gas hoeft op te stoken. De energie gaat echter *niet* verloren. Ze verdwijnt alleen maar uit het huis. In grotere steden is daardoor in de winter de temperatuur meestal een paar graden hoger dan op het platteland.



machines en energiebehoud



Perpetuum mobile

Sinds duidelijk werd dat energie niet werkelijk verloren gaat, hebben mensen zich nóg meer ingespannen om te zorgen dat ze een machine bouwden die vanzelf energie leverde. Ze realiseerden zich echter niet dat diezelfde wet van behoud van energie zich nu tegen hen keerde: Je kunt namelijk ook de wet formuleren als:

Energie kan niet uit het niets ontstaan.

Stel je zou een volkomen wrijvingsloze machine hebben die eeuwig bewoog. Als je die machine dan arbeid laat verrichten, onttrek je energie aan de machine! Maar daarmee zul je dan ook het bewegen van de machine aantasten. Die staat dus na enige tijd stil.

Veel machines werken op warmte, bijv. de stoommachine, de stoomturbine, verbrandingsmotoren. Men heeft vaak gedacht: Als we nu eens die ontwikkelde warmte van de machine weer gebruiken om de machine zelf te laten werken. Of, nog beter,: Als we nu eens de warmte uit de lucht of uit het zee-water (schepen!) gebruiken als energiebron.

Mensen die zo dachten, hadden niet door dat er ook nog een tweede wet geldt, die zoiets onmogelijk maakt.

Die wet luidt:

Bij elk proces wordt de ontstane warmte altijd verdeeld over méér materie. Het kost energie om die warmte weer te concentreren in minder stof.

Maar dat laatste hebben we wél nodig om de hoge temperatuur te bereiken, waarmee we een machine aan de gang kunnen krijgen. Er zal dus altijd energie bij moeten.

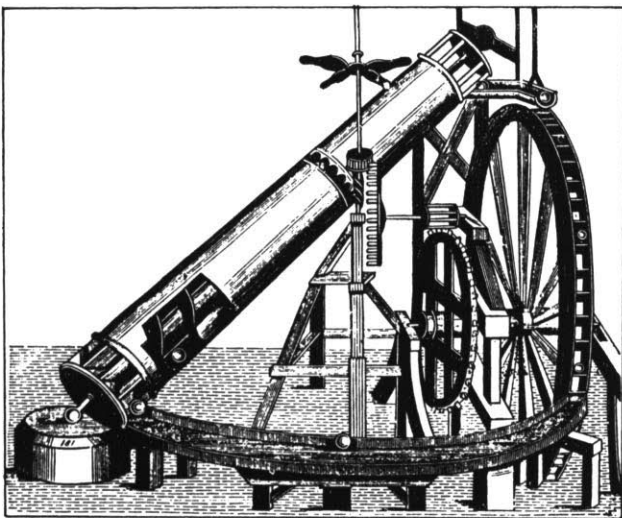
de otec-centrale: toch een perpetuum mobile?

Overgenomen uit het AO-boekje *Perpetuum mobile*, no. 1746.

De nulmotor en de OTEC-centrale

Ondanks de nieuwe inzichten in de onmogelijkheden en beperkingen van de natuur, bleven er lieden hun tijd verdoen met het uitvinden van de eeuwigdurende energiekringloop. 'En toch moet 't kunnen ...' hamerde het in hun war-rige hoofden en eerlijk is eerlijk, aan vindingrijkheid heeft het hun nooit ontbroken. In dat opzicht verdient de 'nulmotor' van Gamgee de aandacht. John Gamgee was een Londense natuurkundeprofessor, die in 1880 in Amerika een nieuw soort brandstofloze stoommachine uitvond. Hij noemde die machine zijn 'nulmotor', omdat de krachtbron in plaats van water ammoniak gebruikte als voortstuwingsmedium. Water kookt bij 100 graden C en geeft dan stoom af, die onder druk de zuigers in cilinders op en neer laat bewegen. Om dat water aan de kook te brengen is energie uit fossiele brandstoffen nodig. Ammoniak heeft als vluchtige eigenschap om al te koken bij nul graden C en dat was voor Gamgee het absolute ei van Columbus. De nulmotor was weliswaar geen perpetuum mobile in de filosofische betekenis van het woord en dus niet behorend tot type 1 of 2, maar in elk geval wel een brandstofloze motor, omdat de energie om ammoniak te laten koken en ammoniakgas onder druk te produceren, onttrokken kan worden aan de buitenlucht.

Het ontwerp van de nulmotor voorzag in een gesloten systeem, waarbij het ammoniakgas na gedane arbeid werd opgevangen om tot vloeistof te condenseren en vervolgens werd teruggevoerd naar het reservoir voor de volgende kringloop. Op het eerste theoretische gezicht zag de nulmotor er gezond uit, maar Gamgee had weer iets over het hoofd gezien. De arbeid, die hij won met de verdamping van de ammoniakvloeistof werd weer teniet gedaan in het gesloten kringloopsysteem, waarin het ammoniakgas sterk afkoelt bij uitzetting. Beginnend bij nul graden C en bij een druk van 4 atmosfeer, daalt de temperatuur van het gas naar min 33 graden C, wanneer het volume is verviervoudigd. Wanneer het gas vervolgens moet condenseren tot vloeistof is daarvoor



Een ingewikkeld antiek ontwerp voor een brandstofloze krachtbron. De bedoeling van dit perpetuum mobile was, dat de machinerie voldoende energie uit niets putte om bomen door te zagen

de otec-centrale: toch een perpetuum mobile?

een temperatuur nodig, die veel lager ligt dan min 33 graden C. En ook voor koeling is energie nodig en met de wet van Carnot in de hand kan worden bewezen dat in de nulmotor de hoeveelheid energie om de benodigde koeling te geven groter is dan de nulmotor als krachtbron kan opleveren. Om de nulmotor als krachtbron te kunnen gebruiken, zou hij dus met een hulpmotor uitgerust moeten worden en daarmee zou het ding zijn doel wel heel erg voorbijstreven.

Toch kan 'ammoniakstoom' nuttig zijn bij het verwezenlijken van een alternatieve energiebron, die wel iets van een perpetuum mobile weg heeft. In Amerika heeft het Lockheed concern groen licht gekregen voor het ontwerp van de zogenaamde OTEC-centrale. OTEC staat voor Ocean Thermal Energy Conversion en wil elektrische energie winnen uit het temperatuurverschil tussen oppervlaktelaag en dieper gelegen waterlagen in de oceaan. De oceaan is eigenlijk een enorme warmteaccu met de pluspool aan het oppervlak en de minpool in de diepte. Het temperatuurverschil, dat in tropische gebieden en in de Golfstroom gemiddeld 22 graden (tussen 27 en 5 graden C) bedraagt, kan nuttig worden gebruikt voor de opwekking van elektrische energie op een economisch verantwoorde basis. Dat zou betekenen dat het benutten van het temperatuurverschil tussen de zeewaterlagen een brandstofloze en zeer milieuvriendelijke alternatieve energiebron oplevert. Deze gedachte is niet nieuw. Wél nieuw is dat het door energiekeorts getroffen Amerika er veel voor voelt om 's werelds grootste warmteaccu als bron van veel energie aan te boren. Tegen 1990 zou de eerste reusachtige en grotendeels onder het oppervlak van de oceaan verankerde elektriciteitscentrale, werkend op het simpele principe van het temperatuurverschil, 160 megawatt kunnen leveren: voldoende voor de energiebehoefte van een grote stad.

De zware dobber van Lockheed

Het OTEC-principe begint de laatste tijd vooral in de VS een veel-, zoniet allesbelovende klank te krijgen. Het vooruitzicht is dan ook bijna te mooi om waar te zijn. Volop elektrische energie, weliswaar ten koste van enorme aanvangsinvesteringen, maar niet in ruil voor milieuverontreinigingen door het verstoken van fossiele brandstoffen, dat is wat een OTEC-centrale te bieden heeft. De oceaan wordt benut als een batterij van groot vermogen, die zijn lading behoudt zo lang het zonnetje maar schijnen wil.

Gedetailleerde plannen voor de constructie van een OTEC-centrale zijn uitgewerkt door twee Amerikaanse technische concerns: TRW Inc. en Lockheed Missiles and Space Company. In beide concepten is het verbluffend simpele principe van de energie-omzetting gelijk. Geprofiteerd wordt van het vrij grote temperatuurverschil tussen zee-oppervlak en de lagen op een diepte tussen ongeveer 250 en 500 meter.

Tussen de oceaanoppervlakte met een hoge temperatuur en de diepere lagen met een veel lagere temperatuur, wordt in een gesloten systeem ammoniak rondgepompt. Onder een bepaalde druk kan ammoniak ook rond de 25 graden Celsius aan de kook worden gebracht en van de vloeibare toestand snel overgaan in de gasvormige toestand.

In de OTEC-centrale gebeurt dit in een verdamper op oppervlakteniveau, waar het warme water in grote hoeveelheden langs de met ammoniak gevulde koelvlakken stroomt. De koude ammoniak onttrekt dan warmte aan het zeewater, gaat koken, wordt ammoniakstoom onder hogedruk door de uitzetting en kan als zodanig worden benut om een turbine aan het draaien te zetten. De tur-

de otec-centrale: toch een perpetuum mobile?

bine heeft dan de energie gekregen om een elektrische generator te bekrachtigen voor de opwekking van elektriciteit. De gewonnen energie moet dan met behulp van leidingen op de zeebodem naar de distributiestations aan de kust worden getransporteerd, reden waarom toekomstige OTEC-centrales zich bij voorkeur niet ver in zee moeten bevinden. De ammoniakstoom wordt in het gesloten systeem na gedane arbeid naar de dieper gelegen condensator gevoerd, waar het omgekeerde proces plaats vindt als in de verdamper. Via de koelvlakken van de condensator geeft de ammoniakstoom de overgebleven warmte-energie terug aan de zee en neemt het langs stromende koude zeewater de restenergie weer op. De ammoniakstoom condenseert tot vloeistof en wordt door de verderop gelegen pomp aangezogen, zodat de cyclus met ammoniakvloeistof in de aanvang herhaald kan worden.

Van thermische waterverontreiniging kan, noch bij de verdamper noch bij de condensator sprake zijn. Berekeningen wijzen uit dat beide warmtewisselaars nog géén twee graden temperatuurverschil op het omringende zeewater uitoefenen. De verdamper geeft bij een inname van 'warm' zeewater van 26,5 graden C koelwater van 25 graden C af en de condensor neemt water van 8 graden C op en geeft water van 9 graden C af. Nadelige invloeden op de zeefauna en -flora zullen er niet zijn.

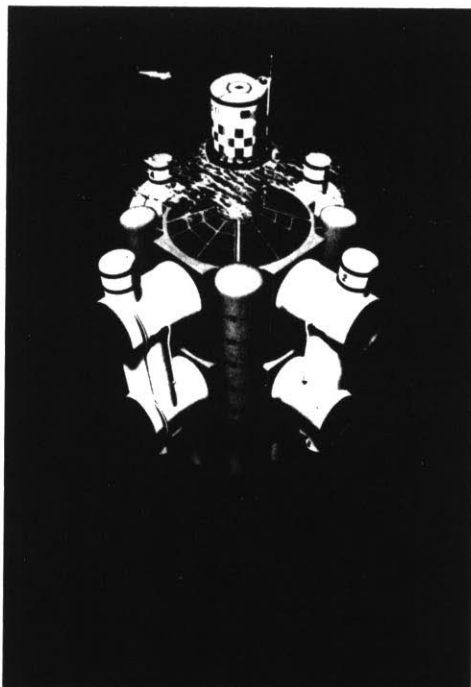
De eerste man, die even doordacht, toen hij in 1881 vernam dat het verschil in temperatuur tussen oceaanoppervlak en de wat dieper gelegen zeelagen nogal groot is en een soort perpetuum mobile kan opleveren, was de Franse natuurkundige Jacques d'Arsonval. Hij beschreef de mogelijkheid om energie aan de warme zeewaterlagen te onttrekken in een opstel, dat weliswaar gepubliceerd werd, maar dat hoegenaamd geen belangstelling wekte.

Pas in 1920 blies de Franse student Georges Claude het stof van het geschrift. Hij bestudeerde het grondig en sloeg aan het construeren. Tien jaar later had hij een primitieve OTEC-centrale gebouwd. Deze proefinstallatie werd verscheept naar de Mantanzas Baai bij Cuba en volgens de verwachtingen leverde de eerste OTEC-centrale in de praktijk 22 kilowatt op. Twee weken na de ingebruikneming werd de centrale door hoge golven op de kust te pletter geslagen. De kortstondige opgevlamde belangstelling voor het OTEC-idee verdween weer.

Wederom gingen er dertig jaar voorbij, alvorens ingenieurs zich weer voor de brandstofloze energiebron gingen interesseren. Dit keer waren het in 1964 J. Hilbert Anderson en zijn zoon James, die aangemoedigd door de opkomende energieschaarste, propaganda gingen maken voor het OTEC-principe. Zij lieten het niet bij woorden, hoewel het nog tot 1975 moest duren voordat zij de praktische werking van het OTEC-principe aantoonde met een recht-hoekig buizenstelsel. Neergelaten in het zwembad van het Shamrock Hilton Hotel in Houston, Texas, bleek het apparaat in staat te zijn de lampjes van een kerstboomverlichting aan het branden te krijgen. De probeersels van Claude, Anderson en nog enkele anderen hebben er uiteindelijk toe geleid dat de Amerikaanse stichting voor zuiver wetenschappelijk onderzoek en de Energy Research and Development Administration (ERDA) gingen inzien dat het OTEC-idee weliswaar geen perpetuum mobile was, maar toch een belangrijke toekomstbelofte inhield. Er kwam geld op tafel voor voortgezet onderzoek met als belangrijkste resultaten de twee, nu gereed gekomen ontwerpen voor grote OTEC-centrales van TRW en Lockheed.

De OTEC-centrale van TRW bestaat ruwweg uit een cilinder met een doorsne-

de otec-centrale: toch een perpetuum mobile?



Tekenaarsimpressie van de reusachtige OTEC-centrale van Lockheed, zoals die over enkele jaren in tropische zeewateren verankerd moet worden

de van 110 meter met daarin een platform dat de controleruimten bevat. Dit platform steekt boven water uit.

Onder deze grote cilinder steekt een buis van glasvezelmateriaal van 18 meter doorsnede naar beneden tot een diepte van ruim 1300 meter. Via deze diepstekende buis wordt het koude water omhoog gezogen. Deze OTEC-centrale zou goed zijn voor een vermogen van 100 megawatt.

Het Lockheed-ontwerp is ambitieuzer van opzet. Deze OTEC-centrale krijgt een totale lengte van 353 meter en bevindt zich, inclusief het platform, onder water. Alleen de top van de reusachtige installatie steekt boven het wateroppervlak uit en dient als ventilatieruimte en als helikopterdek. Bijzonder aan dit ontwerp is dat de in de diepte stekende koelwaterbuis een telescopische constructie heeft van in totaal 35.000 ton, zodat het gesloten ammoniak-circulatie systeem tot op zekere hoogte regelbaar is. De energie-opwekking vindt plaats in vier modules met bovenin de verdamperen en onderin de condensatoren. Daar tussenin bevinden zich de vier krachtcentrales, bestaande uit vier maal twee turbines. Hoewel de Lockheed OTEC-centrale verankerd wordt aan de zeebodem, drijft het geheel vrij in zee als een zware dobber en moet het kolossale geval, evenals een onderzeeboot, met drijftanks in de juiste onderwaterpositie worden gehouden.

— Kun je uitleggen waarom de OTEC-centrale géén perpetuum mobile is?

Overigens, de manier waarop machines als een warmtepomp of een koelkast werken, lijkt erg veel op de werking van de hiervoor beschreven OTEC-centrale. Bij een warmtepomp en een koelkast gaat het er om met een *kleine hoeveelheid energie* die in een pomp gestopt wordt *een veel grotere hoeveelheid warmte te verplaatsen*. De koelkast verplaatst die warmte van binnen naar buiten, zodat de temperatuur in de koelkast daalt. Bij een huis met een warmtepomp, wordt warmte van buiten naar binnen verplaatst, zodat de temperatuur in huis stijgt.

Begeleidingscommissie S.V.O.-project 0213 (vooronderzoek voor het PLON, 1972-1974)

F. van de Maesen (voorzitter tot 1973); hoogleraar natuurkunde Technische Hogeschool Eindhoven
 N.J. Heijkoop (voorzitter 1973-1974); inspecteur voortgezet onderwijs
 W.P.J. Lignac (secr.); secretaris Commissie Modernisering Leerplan Natuurkunde
 S. Auer, algemeen didacticus Universiteit van Amsterdam
 F. Balkema, inspecteur voortgezet onderwijs
 H.P. Hooymayers, lector natuurkundendidactiek Rijks Universiteit Utrecht
 H.J.L. Jongbloed (1972-1973), mediadeskundige NIAM
 J. Schweers, leraar natuurkunde havo/vwo
 J. Smit, inspecteur voortgezet onderwijs
 E. Warries, hoogleraar onderwijskunde Technische Hogeschool Twente
 M. van Wieringen (1973-1974), mediadeskundige NIAM

Stuurgroep PLON (1974-heden)

H.P. Hooymayers (voorzitter), hoogleraar natuurkundendidactiek Rijks Universiteit Utrecht
 W.P.J. Lignac (secr. tot 1978), secretaris Commissie Modernisering Leerplan Natuurkunde
 A.A.M. Agterberg (secr. sedert 1978), secretaris Advies Commissie voor de Leerplan Ontwikkeling Natuurkunde in oprichting
 P. Broekman (sedert 1980), hoofd afdeling Bèta en Gamma-vakken CITO
 F. Dekkers (sedert 1979), hoofddocent natuurkunde Moller Instituut
 H. Lengkeek (tot 1977), leraar natuurkunde mavo
 D.A. Lockhorst (tot 1978), leraar natuurkunde havo/vwo
 J. Schipper (sedert 1980), medewerker A.P.S.
 A. Snater (tot 1980), hoofddocent natuurkunde Stichting Opleiding Leraren
 F.J. Steenbrink (tot 1978), leraar natuurkunde vwo
 J.M.F. Teunissen (tot 1975), onderwijskundige Rijks Universiteit Utrecht
 W.C. Vink (tot 1979), directeur Christelijke Mavo te Putten
 R. de Vries (sedert 1980), leraar natuurkunde havo, vwo, namens de NVON
 E. Warries (tot 1975), hoogleraar onderwijskunde Technische Hogeschool Twente
 S.A. Wouthuysen (tot 1976), hoogleraar natuurkunde Universiteit van Amsterdam

Kerngroep mavo

G.H. Frederik, vakdidacticus Rijksuniversiteit Utrecht; tot 1979 voorzitter van de ACLO-n i.o.
 H. Eeftink (sedert 1980), leraar natuurkunde mavo
 D. Hobo (tot 1979), directeur van de Chr. Mavo de Lier
 S.G.C. Markering, hoofddocent natuurkunde Gelderse Leergangen
 Ch. van Raemdonck (sedert 1980), leraar natuurkunde mavo (PLON)
 J. Vastbinder (sedert 1980), leraar natuurkunde M.T.S.
 W.C. Vink (tot 1979), directeur Christelijke Mavo Putten

PLON-team mavo/havo/vwo-onderbouw

H.F. van Aalst
 W. van Bochoven (1976-1978)
 W. Bijker (1979-1981), Rijks Universiteit Utrecht
 H. Boelhouwer (sedert 1979), S.V.O.
 S.O. Ebbens (1976-1980)
 C. Floor (1979-1980)
 A.C.L. van Gameren (sedert 1977)
 D. van Genderen, Rijks Universiteit Utrecht
 F.L. Gravenberch (sedert 1978)
 C.A.S. Groen (tot 1980)
 W.H. Kamphuis (sedert 1975)
 J. Kortland (sedert 1980)
 B.M. de la Parra (sedert 1977)
 B. Peluassy
 P. de Raad (1977-1978), onderzoeksassistent
 A.E. van der Valk (sedert 1980)
 R.F.A. Wierstra
 Th. Wubbels (1978-1979)
 J. Zwarts (1977-1978), onderzoeksassistent

PLON-administratie

E. van den Broek (1976-1979)
 R. Lindeman (1977-1980)
 M. Rolff van den Baumen (1974-1979)
 B. Schillert (sedert 1980)
 A.G. Schwering (sedert 1980)
 H. Veurink (tot 1974)

Tekeningen

A. Lurvink (Onderwijsmedia instituut
 – Rijks Universiteit Utrecht)
 H. de Waal (Onderwijsmedia instituut
 – Rijks Universiteit Utrecht)

Foto's

A.C.L. van Gameren (PLON)
 W.H. Kamphuis (PLON)

PLON-CITO (namens CITO)

F. Boessenkool
 P. Broekman
 C. Hellingman
 T. Heuvelmans
 H. Jaspers
 J. de Kanter

Proef- en volgscholen 1980-1981

Chr. Mavo Putten te Putten
 Chr. Mavo de Lier te De Lier
 Thorbecke S.G. te Arnhem (mavo-afdeling)
 Edith Stein College te Den Haag
 Chr. Mavo Mariahoeve te Den Haag
 Maasveld Mavo te Blerick
 Regina Pacis Streekschool te Oudewater
 R.S.G. Schagen te Schagen
 Hertog Jan College te Valkenswaard
 Marnix College te Ede
 Niels Stensen College te Utrecht
 Ashram College te Alphen a/d Rijn
 Mavo de Bark te Zaandam
 S.G. Oost Betuwe te Bemmelen
 R.S.G. Brokdele te Breukelen
 Eemland College Noord te Amersfoort
 Grotius College te Heerlen
 S.G. Nijmegen Oost te Nijmegen
 Chr. S.G. de Brug te Lelystad
 Dr. Edith Stein Mavo te Eindhoven
 Michaël Mavo te Beek-Ubbergen
 Chr. S.G. Jan van Arkel te Hardenberg
 Mavo 't Fregat te Zaandam
 Chr. S.G. Revis te Deventer

*Overzicht van PLON-thema's voor mavo en onderbouw
havo-vwo*

VOOR DE 2e KLAS

- Een eerste verkenning in de natuurkunde
- Mensen en metalen — themaboek
- Keuzeonderzoeken
- Werken met water — themaboek
- Leven in lucht
- IJs, water en stoom (I en II)

Tevens zijn beschikbaar:

- Terugblik 2e klas, avol/app. gidsen, rommelpakket Leven in lucht, waterbladen en demonstratiebladen Werken met water.

VOOR DE 3e KLAS

- Bruggen
- Zien bewegen
- Geluid weergeven
- Natuurkunde in de samenleving: Water voor Tanzania
- Elektrische schakelingen — instructieboekje
- Energie thuis
- Natuurkunde in de samenleving: Energie in de toekomst

Tevens zijn beschikbaar:

- Kleur en licht
- Avol/app. gidsen

VOOR DE 4e KLAS MAVO EN DE 3e KLAS HAVO-VWO

- Verkeer en veiligheid
- Krachten — instructieboekje
- Natuurkunde in de samenleving: Stoppen of doorrijden?
- Verwarmen en isoleren
- Schakelen en regelen
- Machines en energie
- Natuurkunde in de samenleving: Kernwapens

Tevens zijn beschikbaar:

- Repeteerthema voor het eindexamen mavo
- Examenboekje voor mavo
- Avol/app. gidsen