

4 Energie

2 havo / 2 vwo

4.0 Inhoud

4.1	Arbeid en energie	2
	– Arbeid	2
	– Energie	3
	– De wet van behoud van energie	4
4.2	Soorten energie	6
	– Chemische energie	6
	– Zwaarte energie	7
	– Kinetische energie	8
	– Veerenergie	8
	– Voorbeelden	9
4.3	Vermogen en rendement	11
	– Vermogen	11
	– Kilowattuur (kWh)	11
	– Rendement	12
4.4	Warmte	13
	– Warmte	13
	– Fase-overgangen	14
	– Dichtheid	15
4.5	Transport van warmte	18
	– Verplaatsing van warmte	18
	– Warmtegeleiding	18
	– Warmtestroming	18
	– Warmtestraling	19
	– Warmte-isolatie	20
4.6	Warmte opnemen en warmte afstaan	21
	– Verandering van inwendige energie	21
	– Soortelijke warmte	21

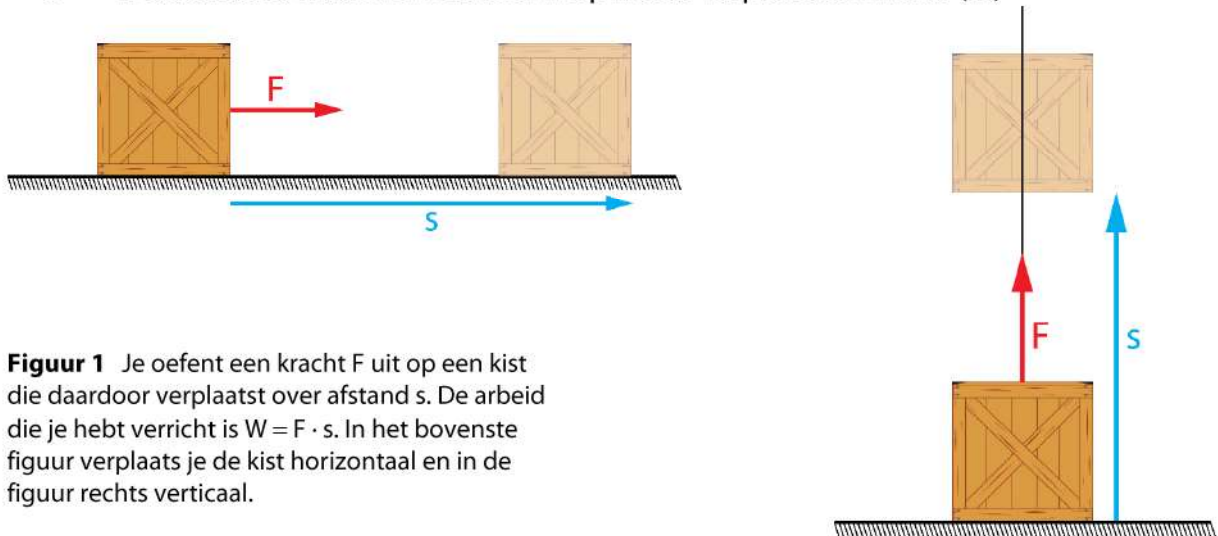
4.1 Arbeid en energie

Arbeid

Om te begrijpen wat energie is moet je eerst de nieuwe grootte **arbeid** kennen. Arbeid heeft als symbool hoofdletter **W** van het Engelse "work". Op een voorwerp kun je arbeid verrichten. Wat je dan doet is een kracht uitoefenen en met deze kracht het voorwerp verplaatsen. Vermenigvuldig je de **kracht F** met de **verplaatsing s** dan is dat gelijk aan de arbeid die je op het voorwerp hebt verricht. Zie figuur 1. Omdat arbeid kracht keer afstand is, is de eenheid van arbeid **newton keer meter $N \cdot m$** .

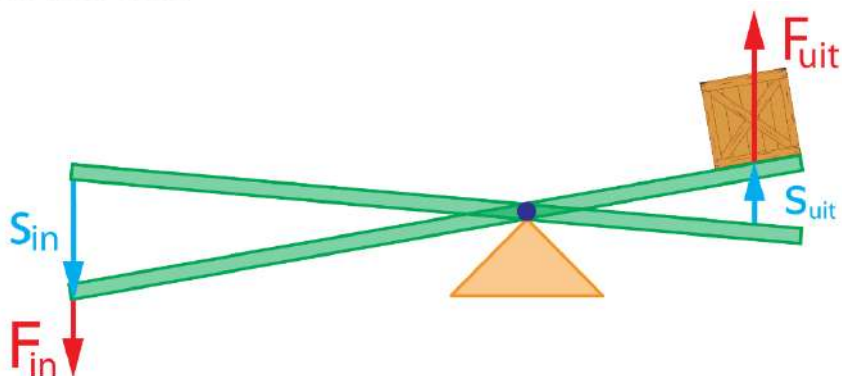
$$W = F \cdot s$$

- W is de arbeid (Engels: work) die kracht F verricht in newton keer meter ($N \cdot m$)
- F is de kracht in newton (N)
- s is de afstand waarover het voorwerp wordt verplaatst in meter (m)



Figuur 1 Je oefent een kracht F uit op een kist die daardoor verplaatst over afstand s . De arbeid die je hebt verricht is $W = F \cdot s$. In het bovenste figuur verplaats je de kist horizontaal en in de figuur rechts verticaal.

Met arbeid is iets bijzonders aan de hand, want de arbeid die je verricht blijft bestaan. Arbeid gaat nooit verloren, eenmaal aanwezig altijd aanwezig. Heel vreemd maar ook heel belangrijk, want het zegt iets over hoe de werkelijkheid in elkaar zit. Laten we eens kijken naar een bekend voorbeeld de **hefboom**.



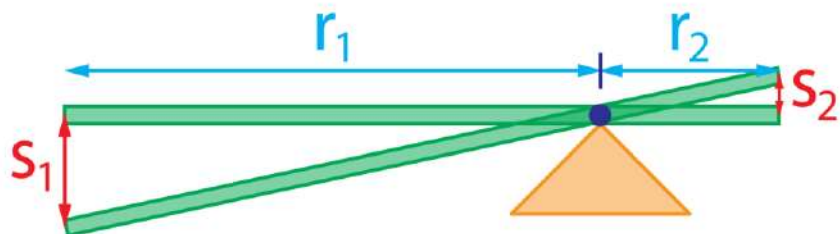
Figuur 2
Arbeid in = arbeid uit.

In figuur 2 zie je een hefboom waarmee je een zware kist omhoog wilt brengen. Je zet de kist op een hefboom, dicht bij het draaipunt en oefent aan de andere kant ver van het draaipunt een kracht uit. De kracht op de kist F_{uit} is veel groter dan de kracht F_{in} die jij uitoefent. Maar de afstand s_{uit} is veel kleiner dan de afstand s_{in} . Een hefboom kan van een kleine kracht een grote kracht maken, maar bij een kleine kracht hoort wel een grote afstand. Als je de krachten en de afstanden meet dan vind je dat de arbeid die je op de hefboom verricht precies gelijk is aan de arbeid die de hefboom op de kist verricht.

$$W_{\text{in}} = W_{\text{uit}} \rightarrow F_{\text{in}} \cdot s_{\text{in}} = F_{\text{uit}} \cdot s_{\text{uit}}$$

- W_{in} is de arbeid die op een voorwerp (de hefboom) wordt verricht ($\text{N} \cdot \text{m}$)
- W_{uit} is de arbeid die het voorwerp op een ander voorwerp (de kist) verricht ($\text{N} \cdot \text{m}$)
- F_{in} is de kracht die op het voorwerp (de hefboom) wordt uitgeoefend (N)
- s_{in} is de afstand waarover het aangrijpingspunt van F_{in} wordt verplaatst (m)
- F_{uit} is de kracht die het voorwerp op een ander voorwerp (de kist) uitoefent (N)
- s_{uit} is de afstand waarover het aangrijpingspunt van F_{uit} wordt verplaatst (m)

In het hoofdstuk kracht hebben je de **momentenwet** geleerd. Die wet zegt dat kracht keer arm linksom gelijk is aan kracht keer arm rechtsom $F_{\text{links}} \cdot r_{\text{links}} = F_{\text{rechts}} \cdot r_{\text{rechts}}$. De momentenwet is het gevolg van de arbeid die behouden blijft. In figuur 3 zie je waarom dit zo is. De afstand s en de arm r zijn recht evenredig, waarmee je bedoelt dat als je afstand s bijvoorbeeld 2,5 keer zo groot maakt de arm r ook 2,5 keer zo groot wordt.



Figuur 3 De momentenwet is een speciaal geval van het behoud van arbeid.

Energie

Arbeid gaat niet verloren en zal op een andere plaats of een ander moment tevoorschijn komen. Bij een hefboom wordt de arbeid die je verricht van de ene kant naar de andere kant verplaatst, waar het meteen beschikbaar is. Maar je kunt arbeid ook opslaan, zodat je het later kunt gebruiken. Opgeslagen arbeid gaat niet verloren maar blijft beschikbaar en opgeslagen arbeid is wat we **energie** noemen.

Energie is opgeslagen arbeid en blijft voor altijd bestaan.
Het symbool van energie is E en de eenheid is de joule met symbool J.
Eén joule is gelijk aan één $\text{N} \cdot \text{m}$.

Het gevolg van de wet van behoud van energie is zichtbaar in bijvoorbeeld een achtbaan. In een achtbaan word je eerst op grote hoogte gebracht. Hiervoor is kracht nodig. De

arbeid die wordt toegevoegd is $W_{in} = F_{in} \cdot s_{in}$. Deze arbeid wordt opgeslagen als energie in het karretje in de vorm van **zwaarte energie**. Bij het naar beneden gaan wordt deze energie omgezet in bewegingsenergie. Onderaan de achtbaan wordt het karretje afgeremd. Daar wordt de bewegingsenergie omgezet in warmte.

Een ander voorbeeld is de schommel. Om een schommel op gang te brengen moet je kracht uitoefenen. De arbeid die je verricht is $W_{in} = F_{in} \cdot s_{in}$. De schommel gaat nu bewegen. Arbeid wordt opgeslagen als **bewegingsenergie**. Op het hoogste punt staat de schommel even stil. Er is dan geen bewegingsenergie meer, maar wel zwaarte energie. In een schommel wordt bewegingsenergie voortdurend omgezet in zwaarte energie waarbij de totale hoeveelheid energie niet verandert. Uiteindelijk komt de schommel tot stilstand en dat komt omdat er een wrijvingskracht werkt die arbeid verricht. Daar gaan we het later nog over hebben.



Figuur 4 In een pretpark zie je hoe de wet van behoud van energie werkt.

Ook bij dominostenen zie je de wet van behoud van energie in werking. Iedere keer als je een steentje overeind zet oefen je arbeid uit en voeg je een beetje energie toe. Alle opgezette steentjes samen bevatten veel energie. Valt er eentje om dan ontstaat er een kettingreactie, waarbij de opgeslagen energie van alle steentjes vrijkomt.



Figuur 5 Dominostenen.

De wet van behoud van energie

Energie is opgeslagen arbeid en blijft in het voorwerp aanwezig zolang het niet naar buiten kan. Dit is de **wet van behoud van energie**:

Energie is opgeslagen arbeid en blijft voor altijd aanwezig.

De wet van behoud van energie komt bijzonder goed van pas bij allerlei natuurkundige problemen. Je moet goed in de gaten houden hoeveel energie er binnenkomt en hoeveel

energie eruit gaat. In die zin lijkt energie op geld, want ook geld blijft bestaan. Je verdient geld, je bewaart het een tijdje en je geeft het daarna weer uit. Maar het geld dat jij uitgeeft verdient iemand anders. En als je het niet hebt uitgegeven blijft het in je portemonnee.

Laten we de boekhouding van energie bekijken. In het begin bevat een voorwerp een hoeveelheid energie die we E_{begin} noemen en we gaan kijken wat er gebeurt. Het kan zijn dat er nog wat extra arbeid op het voorwerp wordt verricht, waardoor de totale hoeveelheid energie toeneemt met E_{in} . Het kan ook zijn dat het voorwerp arbeid verricht op een ander voorwerp, waardoor de hoeveelheid energie vermindert met E_{uit} . Maar we kunnen in ieder geval stellen dat de energie waarmee je begint plus de energie die erbij komt min de energie die eruit gaat gelijk is aan de energie die je over hebt. Dit is in woorden de wet van behoud van energie. In formulevorm schrijven we:

Wet van behoud van energie

$$E_{\text{begin}} + E_{\text{in}} - E_{\text{uit}} = E_{\text{eind}}$$

- E_{begin} is de energie die het voorwerp in het begin heeft (J)
- E_{in} is de energie die het voorwerp erbij krijgt, omdat er arbeid op wordt verricht (J)
- E_{uit} is de energie die het voorwerp verliest omdat het zelf arbeid verricht (J)
- E_{eind} is de energie die aan het eind in het voorwerp aanwezig is (J)

Zoals ik al zei lijkt energie precies op geld, want daarbij gebruik je dezelfde boekhouding. Je kijkt wat je hebt, wat erbij komt en wat eruit gaat. En als je niets vergeet op te schrijven moet de boekhouding kloppen. Het geld dat je aan het begin van de dag hebt plus het geld dat je die dag verdient min het geld dat je die dag uitgeeft is het geld dat je aan het einde van de dag hebt. Heel simpel eigenlijk, maar oh zo belangrijk.

De vergelijking tussen energie en geld gaat nog een beetje verder. Want net zoals geld in verschillende vormen voorkomt is dat ook voor energie het geval. Stel je hebt 20 euro dan heb je misschien een briefje van 20 of twee briefjes van 10 of vier briefjes van 5 of 10 munten van 2 euro of 20 munten van 1 euro. Het is allemaal gelijk aan 20 euro, maar het ziet er wel anders uit. Je kunt het wel omruilen, maar dat verandert de hoeveelheid geld die je hebt niet.

En zo werkt het ook bij energie. Er zijn verschillende soorten energie waarvan je er in de volgende paragraaf een aantal leert kennen. De belangrijkste twee heb ik al genoemd, namelijk **zwaarte energie** en **bewegingsenergie**. Maar er bestaat ook **veerenergie**, **chemische energie**, **elektrische energie**, **kernenergie**, **stralingsenergie**, en nog wel wat meer. En het bijzondere is dus dat je ze kunt omruilen. Laat je een steen vallen dan ruil je zwaarte energie om in bewegingsenergie.

4.2 Soorten energie

Energie heb je in verschillende soorten. Voor iedere soort geldt dat het opgeslagen arbeid is, maar de manier waarop arbeid wordt bewaard is verschillend. Laten we beginnen met chemische energie.

Chemische energie

Scheikundige stoffen zijn in staat om energie op te slaan. Opgeslagen **chemische energie** vind je in brandstof, in voedsel en in batterijen. Er is arbeid uitgeoefend om een chemische reactie te laten verlopen en deze arbeid is opgeslagen als chemische energie. Loopt de reactie de andere kant uit dan komt de opgeslagen arbeid weer vrij.

Brandstoffen bevatten opgeslagen chemische energie. Om uit water en kooldioxide een benzinemolecuul te maken is arbeid nodig. Deze arbeid komt vrij als je de benzine laat reageren met zuurstof. Het reageren met zuurstof noem je verbranden en vandaar dat benzine een **brandstof** wordt genoemd. De hoeveelheid chemische energie die in een brandstof is opgeslagen kun je opzoeken en wordt de **stookwaarde** of de **verbrandingswarmte** genoemd. Hieronder vind je de verbrandingswarmte van een aantal brandstoffen. Bij vaste stoffen is dit de hoeveel energie die vrijkomt als je één kilogram verbrandt. Bij vloeistoffen en gassen is dit de hoeveel energie die vrijkomt als je één kubieke meter verbrandt.

Vaste stoffen	Verbrandingswarmte (J / kg)
bruinkool	$21 \cdot 10^6$
hout	$16 \cdot 10^6$
steenkool	$29 \cdot 10^6$
turf	$11 \cdot 10^6$

Vloeistoffen	Verbrandingswarmte (J / m ³)
alcohol	$22 \cdot 10^9$
benzine	$33 \cdot 10^9$
diesel	$36 \cdot 10^9$
spiritus	$18 \cdot 10^9$
stookolie	$40 \cdot 10^9$

Gassen	Verbrandingswarmte (J / m ³)
methaan	$36 \cdot 10^6$
ethaan	$61 \cdot 10^6$
propaan	$94 \cdot 10^6$
butaan	$121 \cdot 10^6$
aardgas	$32 \cdot 10^6$
waterstof	$10,8 \cdot 10^6$

Bij voedsel heb je het niet over de verbrandingswarmte maar over de **voedingswaarde**, maar daarmee bedoel je zo ongeveer hetzelfde. Je neemt steeds 100 gram voedsel en kijkt hoeveel energie er vrijkomt als je het opeet en verteert.

Een ouderwetse eenheid voor energie is de **calorie** en als je 1000 calorieën hebt is dat een **kilocalorie (kcal)**. Eigenlijk zou niemand dit meer moeten gebruiken, maar dat gebeurt nog wel. Kijk maar op de verpakking van een voedingsmiddel. Gelukkig staat naast de hoeveelheid kcal per 100 gram ook de hoeveelheid **kilojoule (kJ)** vermeld. Voor het omrekenen van calorie naar joule gebruik je het volgende:

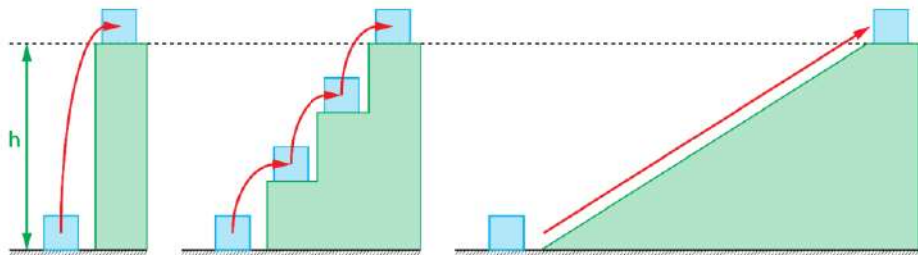
Voedsel	Voedingswaarde per 100 gram (kJ)
aardappelen, gekookt	346
aardappelen, gefrituurd	1205
banaan	363
biefstuk	534
brood, tarwe	1117
brood, wit	991
cashewnoten	2477
cheeseburger	1189
chocolade, puur	2152
halvarine (40%)	1514
ijs (roomijs)	1077
kaas 45+	1525
mayonaise	3105
slagroom	1487
suiker	1683

één calorie = 4,184 joule

Zwaarte energie

Je kunt een voorwerp **zwaarte energie (E_z)** geven door het op te tillen en het ergens op te leggen of aan iets vast te maken. De kracht die je moet uitoefenen bij het optillen is de zwaartekracht en de afstand is gelijk aan de verandering van de **hoogte (h)**.

Figuur 6 Zwaarte energie. Met een kracht wordt de hoogte van een voorwerp verandert.



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

- E_z is de zwaarte energie in joule (J)
- m is de massa in kilogram (kg)
- g is de valversnelling in meter per seconde kwadraat (m/s^2)
- h is de verandering van de hoogte in meter (m)

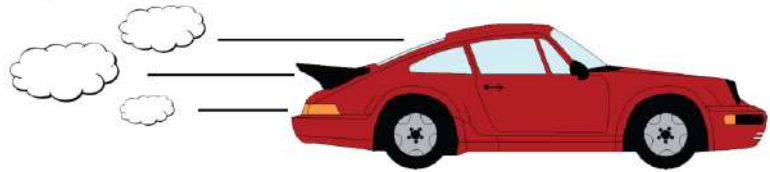
BEWIJS

- $W = F \cdot s$
- invullen $F = F_z = m \cdot g$ en $s = h$
- geeft $W = E_z = m \cdot g \cdot h$

Kinetische energie (bewegingsenergie)

Je kunt een voorwerp bewegingsenergie geven door zijn snelheid te veranderen. In plaats van bewegingsenergie gebruiken we **kinetische energie (E_K)**. Kinêtikós komt uit het Grieks en heeft betrekking op bewegen.

Figuur 7 Kinetische energie.
Met een kracht wordt de snelheid van een voorwerp veranderd.



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

- E_K is de kinetische energie in joule (J)
- m is de massa in kilogram (kg)
- v is de snelheid in meter per seconde (m/s)

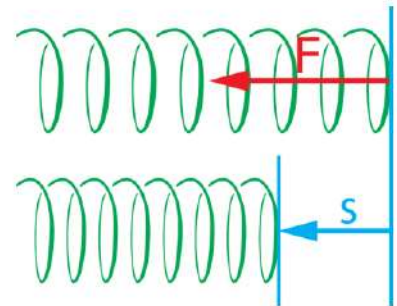
BEWIJS

- $W = F \cdot s$
- invullen $\Sigma F = m \cdot a$ en $s = \frac{1}{2} a \cdot t^2$
- $W = m \cdot a \cdot (\frac{1}{2} a \cdot t^2) \rightarrow W = \frac{1}{2} m \cdot a^2 \cdot t^2 \rightarrow W = \frac{1}{2} m \cdot (a \cdot t)^2$
- invullen $v = a \cdot t$ geeft $W = E_K = \frac{1}{2} m \cdot v^2$

Veerenergie

Als een voorwerp aan een veer is bevestigd kun je het **veerenergie (E_V)** geven. Met een kracht vervormen je de veer en de afstand is gelijk aan de vervorming.

Figuur 8 Veerenergie. Met een kracht wordt de uitrekking van een veer veranderd.



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

- E_V is de veerenergie in joule (J)
- C is de veerconstante in newton per meter (N/m)
- u is de uitrekking in meter (m)

BEWIJS

- $W = F \cdot s$
- invullen $\Sigma F_{\text{gemiddeld}} = \frac{1}{2} C \cdot u$ en $s = u$
- $W = (\frac{1}{2} C \cdot u) \cdot u \rightarrow W = E_V = \frac{1}{2} C \cdot u^2$

Voorbeelden

Laten we nu wat voorbeelden bekijken hoe de wet van behoud van energie in de praktijk werkt. Je zult zien hoe handig het is. Je moet steeds bedenken welke soort energie je in het begin hebt en welke aan het eind. En je moet ook controleren of er misschien energie in- of uitgaat. Bij iedere berekening gebruik je $E_{\text{begin}} + E_{\text{in}} - E_{\text{uit}} = E_{\text{eind}}$.

VOORBEELD vallende steen

Een steen van 200 gram valt van een 10 m hoge toren.

Bereken de snelheid waarmee de steen op de grond valt.

- $E_{\text{begin}} = E_z = m \cdot g \cdot h \rightarrow E_{\text{begin}} = 0,2 \cdot 9,81 \cdot 10 = 19,62 \text{ J}$
- behoud van energie $E_{\text{begin}} + E_{\text{in}} - E_{\text{uit}} = E_{\text{eind}} \rightarrow E_{\text{begin}} = E_{\text{eind}}$ want $E_{\text{in}} = 0$ en $E_{\text{uit}} = 0$
- $E_{\text{eind}} = E_k = \frac{1}{2} m \cdot v^2 \rightarrow E_{\text{eind}} = 19,62 = \frac{1}{2} \cdot 0,2 \cdot v^2$
- $19,62 = 0,1 \cdot v^2 \rightarrow v^2 = 196,2 \rightarrow v = 14 \text{ m/s}$

VOORBEELD steentje omhoogschieten

Met een katapult schiet je een steentje van 5,0 gram recht omhoog. Het elastiek van de katapult heeft een veerconstante $C = 40 \text{ N/m}$. Je rekt het elastiek 20 cm uit.

Bereken hoe hoog het steentje komt.

- $E_{\text{begin}} = E_v = \frac{1}{2} C \cdot u^2 \rightarrow E_{\text{begin}} = \frac{1}{2} \cdot 40 \cdot 0,2^2 = 0,80 \text{ J}$
- behoud van energie $E_{\text{begin}} + E_{\text{in}} - E_{\text{uit}} = E_{\text{eind}} \rightarrow E_{\text{begin}} = E_{\text{eind}}$ want $E_{\text{in}} = 0$ en $E_{\text{uit}} = 0$
- $E_{\text{eind}} = E_z = m \cdot g \cdot h \rightarrow E_{\text{eind}} = 0,8 = 0,005 \cdot 9,81 \cdot h$
- $0,8 = 0,04905 \cdot h \rightarrow h = 16,3 \text{ m}$

VOORBEELD afremmen

Je fietst met 7,0 m/s over een horizontale weg. Je remt af en staat na 6,0 m stil. De arbeid die de remkracht verricht is $E_{\text{uit}} = F_{\text{rem}} \cdot s$. Jij en je fiets wegen samen 60 kg.

Bereken de kracht die de remmen uitoefenen.

- $E_{\text{begin}} = E_k = \frac{1}{2} m \cdot v^2 \rightarrow E_{\text{begin}} = \frac{1}{2} \cdot 60 \cdot 7^2 = 1470 \text{ J}$
- behoud van energie $E_{\text{begin}} + E_{\text{in}} - E_{\text{uit}} = E_{\text{eind}} \rightarrow E_{\text{begin}} - E_{\text{uit}} = 0 \rightarrow E_{\text{begin}} = E_{\text{uit}}$
want $E_{\text{in}} = 0$ en $E_{\text{eind}} = 0$
- $E_{\text{uit}} = F_{\text{rem}} \cdot s \rightarrow 1470 = F_{\text{rem}} \cdot 6 \rightarrow F_{\text{rem}} = 245 \text{ N}$

VOORBEELD een berg op fietsen

Je fietst met 4,0 m/s een berg op. Als je 100 meter hebt afgelegd ben je 10 meter gestegen. De arbeid die je verricht is $E_{\text{in}} = F_{\text{trap}} \cdot s$. Jij en je fiets wegen samen 60 kg.

Bereken de kracht die je uitoefent.

- $E_{\text{begin}} = E_K = \frac{1}{2} m \cdot v^2 \rightarrow E_{\text{begin}} = \frac{1}{2} \cdot 60 \cdot 4^2 = 480 \text{ J}$
- behoud van energie $E_{\text{begin}} + E_{\text{in}} - E_{\text{uit}} = E_{\text{eind}} \rightarrow E_{\text{begin}} + E_{\text{in}} = E_{\text{eind}}$ want $E_{\text{uit}} = 0$
- $E_{\text{eind}} = E_Z + E_K = m \cdot g \cdot h + \frac{1}{2} m \cdot v^2$
- $E_{\text{eind}} = 60 \cdot 9,81 \cdot 10 + \frac{1}{2} \cdot 60 \cdot 4^2 = 5886 + 480 = 6366 \text{ J}$
- $E_{\text{begin}} + E_{\text{in}} = E_{\text{eind}} \rightarrow 480 + F_{\text{trap}} \cdot 100 = 6366 \rightarrow F_{\text{trap}} = 58,86 \text{ N}$

4.3 Vermogen en rendement

Vermogen

Een apparaat verricht arbeid om iets te laten veranderen en deze arbeid kan worden opgeslagen als energie. Als het apparaat veel tijd nodig heeft voor deze verandering heb je er niet zo veel aan. Vaak wil je liever dat het snel gebeurt. De snelheid waarmee een apparaat arbeid levert of energie omzet noemen we het **vermogen (P)** van het apparaat. Het vermogen heeft als symbool hoofdletter P van "power" en de eenheid van vermogen is joule per seconde en dat is gelijk aan watt (W).

$$P = \frac{W}{t} \quad \text{en} \quad P = \frac{E}{t} \quad \rightarrow \quad W = P \cdot t \quad \text{en} \quad E = P \cdot t$$

- P is het vermogen in watt (W)
- W is de geleverde arbeid in joule (J)
- E is de energie in joule (J)
- t is de tijd in seconde (s)

$$1 \text{ joule per seconde} = 1 \text{ watt}$$

Op ieder elektrisch apparaat staat het vermogen en dan weet je hoeveel energie het apparaat per seconde opneemt. Deze energie wordt soms een tijdje opgeslagen, maar komt meestal direct weer uit het apparaat. Denk bijvoorbeeld aan een staafmixer. Op de staafmixer staat dat het een vermogen heeft van 800 W. Iedere seconde neemt het apparaat dus 800 J aan elektrische energie op. Deze energie wordt niet opgeslagen maar verlaat de staafmixer, omdat de messen ronddraaien en daarmee arbeid verrichten.



Figuur 9 Staafmixer van 800 watt.

Kilowattuur (kWh)

De staafmixer heeft een vermogen van 800 watt (W). Als je de staafmixer een uur aanzet gebruikt het $800 \cdot 60 \cdot 60 = 2.880.000$ J energie. Dit is een groot getal en het is daarom handig om een nieuwe eenheid van energie af te spreken de **kilowattuur (kWh)**.

1 kWh is de hoeveelheid energie die een apparaat van 1000 W in één uur opneemt.

$$1 \text{ kWh} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ J}$$

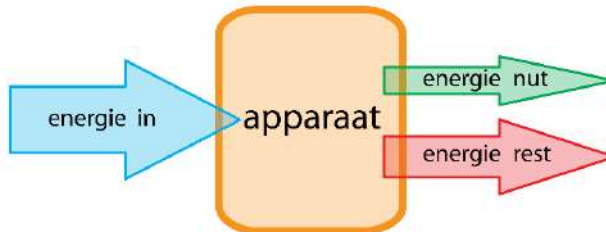
BEWIJS

- $P = 1000 \text{ W} \mid t = 1\text{h} = 60 \cdot 60 \text{ s} \mid E = \dots \text{ J}$
- $E = P \cdot t \rightarrow E = 1000 \cdot 60 \cdot 60 = 3,6 \cdot 10^6 \text{ J}$

Rendement

De staafmixer neemt iedere seconde 800 J op maar deze energie wordt niet allemaal benut om voedsel fijn te hakken. Want bij het hakken wordt het voedsel warm en de arbeid die in warmte is omgezet is niet meer beschikbaar voor het hakken. We kunnen de opgenomen energie spitsen in een deel dat nuttig wordt gebruikt E_{nut} en een deel dat warmte wordt E_{rest} . In figuur 10 zie je hoe de opgenomen energie E_{in} wordt verdeeld tussen E_{nut} en E_{rest} . Het **rendement** geeft aan welk deel van de opgenomen energie nuttig wordt gebruikt.

Figuur 10 Verdeling van de opgenomen energie in een nuttig en een niet nuttig deel.



VOORBEELD het rendement van een elektrische auto

Een elektrische auto rijdt met een constante snelheid en gebruikt $6,0 \cdot 10^7$ J energie om 100 km af te leggen. De motor van de auto moet bij deze snelheid 400 N kracht uitoefenen.

Hoe groot is het rendement van deze auto?

- $E_{\text{nut}} = W = F \cdot s$
- $E_{\text{nut}} = 400 \cdot 100.000 = 4,0 \cdot 10^7$ J
- van de gebruikte $6,0 \cdot 10^7$ J wordt $4,0 \cdot 10^7$ J nuttig gebruikt (67% is nuttig)

VOORBEELD rendement van een benzine auto

Een benzine auto rijdt met een constante snelheid en gebruikt 5,0 liter benzine om 100 km af te leggen. De motor van de auto moet bij deze snelheid 400 N kracht uitoefenen. De verbrandingswarmte van benzine is $33 \cdot 10^9$ J/m³.

Hoe groot is het rendement van deze auto?

- $33 \cdot 10^9$ J/m³ = $33 \cdot 10^6$ J per liter er gaan 1000 liter en één m³
- $E_{\text{in}} = 5,0 \cdot 33 \cdot 10^6 = 1,65 \cdot 10^8$ J
- $E_{\text{nut}} = 400 \cdot 100.000 = 4,0 \cdot 10^7$ J
- van de opgenomen $1,65 \cdot 10^8$ J wordt $4,0 \cdot 10^7$ J nuttig gebruikt (24% is nuttig)

4.4 Warmte

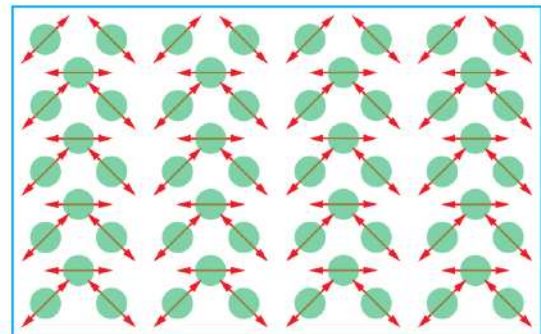
Warmte

Het begrip **warmte** is al een paar keer gevallen, maar ik heb nog niet uitgelegd wat het is. Warmte ontstaat als een wrijvingskracht arbeid verricht of als een chemische stof wordt verbrand. Laten we eerst kijken hoe warmte ontstaat uit de arbeid van een wrijvingskracht. Als je koude handen hebt worden ze warm door ze tegen elkaar te wrijven. Wat gebeurt er dan? Je verricht arbeid, want je oefent een kracht uit en je beweegt je handen. Maar waar blijft die arbeid? Wordt het soms ergens opgeslagen als energie, en zo ja waar dan?

Het klopt dat de arbeid van een wrijvingskracht wordt opgeslagen als energie, namelijk als **inwendige energie** van de atomen van je handen. Alle voorwerpen bestaan uit **atomen** die onzichtbaar klein zijn. Het woord atoom komt van het Griekse "a tomos" wat ondeelbaar betekent. Heel lang is gedacht dat atomen de kleinste deeltjes zijn die bestaan en dat ze niet zijn opgebouwd uit nog kleinere deeltjes. Intussen weten we beter, want atomen bestaan uit **protonen**, **neutronen** en **elektronen**, en protonen en neutronen bestaan uit nog kleiner deeltjes die we **quarks** noemen. Hoe het precies zit is nu niet zo belangrijk. Wel belangrijk is dat atomen krachten op elkaar uitoefenen en dat ze kunnen bewegen. In een wat simpel beeld kun je atomen voorstellen als bolletjes die met veertjes aan elkaar vastzitten. De atomen hebben dus zoiets als veerenergie en ze hebben kinetische energie. En als je de veerenergie en de kinetische energie van alle atomen bij elkaar optelt krijg je de inwendige energie.

De inwendige energie van een voorwerp is de "veerenergie" en de kinetische energie van alle atomen bij elkaar opgeteld.

Warmte is arbeid die wordt opgeslagen als inwendige energie. Als je op een voorwerp wrijft gaan de atomen harder trillen en daardoor stijgt de **temperatuur**. Omdat de atomen in verschillende richtingen trillen komt het voorwerp zelf niet in beweging. De kinetische energie van het hele voorwerp verandert niet, maar de kinetische energie van de atomen waaruit het voorwerp bestaat verandert wel.



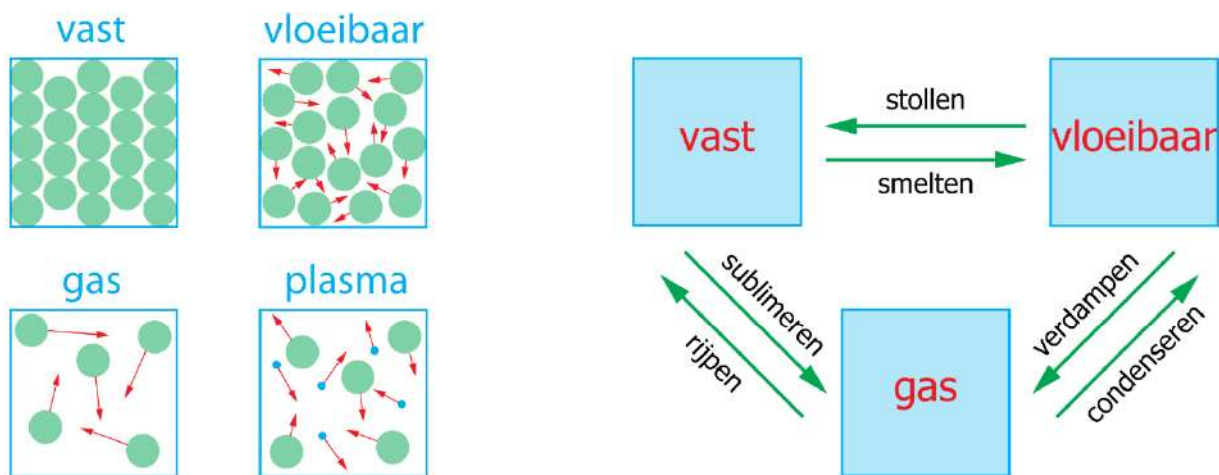
Figuur 11 Inwendige energie.

Over het begrip temperatuur hebben we nog geen goede afspraak gemaakt. Warmte en temperatuur hebben veel met elkaar te maken maar ze zijn niet hetzelfde. Meestal wordt de temperatuur hoger als een stof warmte opneemt, maar niet altijd. We moeten er dus voor zorgen de begrippen warmte en temperatuur goed uit elkaar te houden.

**Warmte is arbeid die wordt opgeslagen als inwendige energie.
Temperatuur geeft de gemiddelde kinetische energie van de atomen aan.**

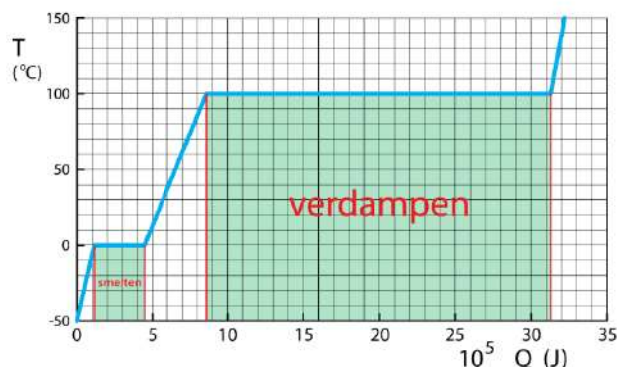
Fase-overgangen

Een stof heeft verschillende verschijningsvormen. We noemen dit de **fasen** van een stof. Laten we water als voorbeeld nemen. Bij een lage temperatuur neemt water de vorm aan van ijs. Het water heeft dan de **vaste fase**, waarbij de atomen wel trillen, maar niet langs elkaar kunnen bewegen. Voegen we warmte toe dan stijgt de temperatuur. De atomen krijgen meer kinetische energie en kunnen nu wel langs elkaar bewegen. Het water heeft dan de **vloeibare fase**. Voegen we nog meer warmte toe dan wordt de temperatuur zo hoog, en de kinetische energie van de atomen zo groot, dat de atomen niet meer bij elkaar blijven. De stof valt uit elkaar en de atomen bewegen kriskras langs elkaar heen. Het water heeft nu de **gasfase**. In figuur 12 zie je de fasen en hoe de fase-overgangen heten. Behalve vast, vloeibaar en gas zie je ook de **plasma fase**. Die komt niet zo vaak voor en vandaar dat er ook geen speciale namen zijn voor overgangen naar de plasma fase. Als een gas een hoge temperatuur krijgt gaat het licht geven en komt het in de plasma fase. Vuur is een plasma van gas met een hoge temperatuur.



Figuur 12 De fasen van een stof en de namen van de fase-overgangen.

Als een voorwerp warmte opneemt wordt de inwendige energie groter. Meestal betekent dit dat de atomen harder gaan trillen en dat ze verder uit elkaar gaan. Je merkt dan dat de temperatuur hoger wordt (vanwege het harder trillen) en dat de stof uitzet (vanwege het verder uit elkaar gaan). Maar bij een fase-overgang wordt de temperatuur NIET hoger als je warmte toevoegt. Dit komt omdat de toename van inwendige energie nu volledig wordt gebruikt om de afstand tussen de atomen te vergroten. Pas als alle atomen een grotere afstand hebben, en de stof een andere fase heeft, neemt de temperatuur weer toe. In figuur 13 zie je hoe de temperatuur verandert als je 1 kg water verwarmt. Tijdens een fase-overgang neemt de temperatuur niet toe en gaan de atomen niet harder trillen, maar ze gaan wel verder uit elkaar.



Figuur 13 1 kg water wordt verwarmd van -50°C tot $+150^{\circ}\text{C}$. Tijdens een fase-overgang blijft de temperatuur gelijk.

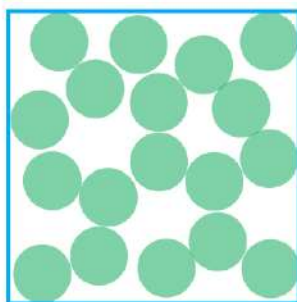
Dichtheid

Zoals je ziet in figuur 12 zijn de atomen in de vaste fase dicht op elkaar gestapeld. Bij de vloeibare fase zit er wat ruimte tussen de atomen en bij de gasfase zit er heel veel ruimte tussen de atomen. De **dichtheid** van de stof verandert. Met de dichtheid bedoel je hoeveel kilogram stof er in een kubieke meter past. De dichtheid is een eigenschap van een stof. Het gaat dus niet om hoeveel kilogram een voorwerp weegt of om het volume (de inhoud) van het voorwerp. De dichtheid van een stof geeft aan hoeveel kilogram een kubieke meter van deze stof bevat. De dichtheid heeft als symbool de **Griekse letter ρ (rho)** en de eenheid van dichtheid is kilogram per kubieke meter **kg/m³**, maar je mag soms ook gram per kubieke centimeter **g/cm³** gebruiken.

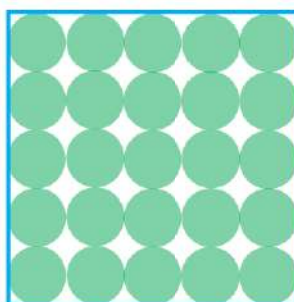
$$\rho = \frac{m}{V}$$

- ρ is de dichtheid in kilogram per kubieke meter (kg/m³)
- m is de massa in kilogram (kg)
- V is het volume in kubieke meter (m³)

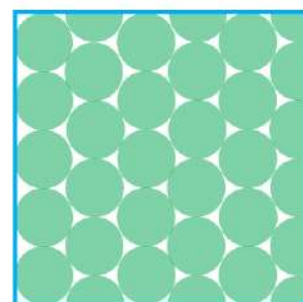
Eén g/cm³ is gelijk aan 1000 kg/m³.



18 atomen



25 atomen

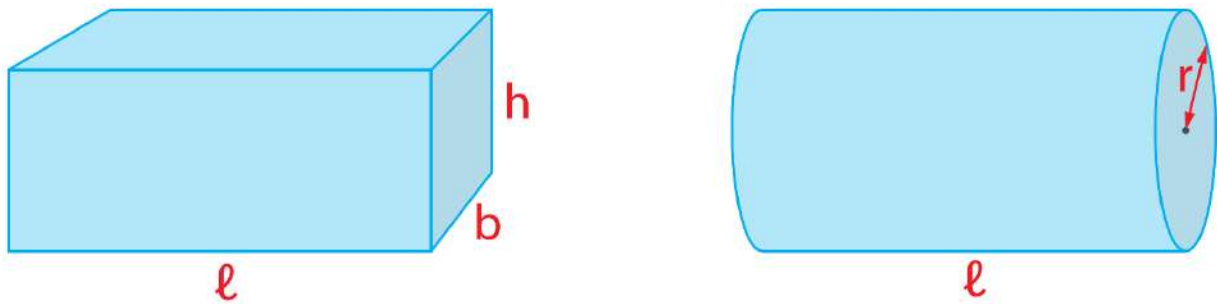


28,5 atomen

Figuur 14 Het stapelen van atomen in een plat vlak.

De dichtheid wordt bepaald door hoeveel ruimte er zit tussen de atomen en door de massa van één atoom. In figuur 14 zie je atomen in een plat vlak. Links zit er ruimte tussen de atomen, in het midden raken ze elkaar, en rechts is de stapeling zo compact mogelijk. De dichtheid wordt groter als er meer atomen in hetzelfde volume passen.

Om de dichtheid uit te rekenen moet je de massa en het volume van een voorwerp weten. Van een doos en een cilinder kun je het volume uitrekenen. Voor een doos geldt $V = b \cdot h \cdot \ell$ en voor een cilinder geldt $V = \pi r^2 \cdot \ell$, waarbij r de straal is van de cilinder. Zie figuur 15. Gebruik je als eenheid van volume kubieke centimeter dan moet je alle lengtes (b , h , ℓ en r) in centimeter invullen.



Figuur 15 Voor een doos geldt $V = b \cdot h \cdot \ell$ en voor een cilinder geldt $V = \pi r^2 \cdot \ell$.

VOORBEELD de dichtheid van ijzer

Een cilindervormig staafje ijzer heeft een straal van 0,50 cm een lengte van 6,0 cm en weegt 37,1 gram.

Bereken de dichtheid van ijzer.

- $V = \pi r^2 \cdot \ell \rightarrow V = \pi \cdot 0,5^2 \cdot 6 = 4,71239 \text{ cm}^3$
- $\rho = \frac{m}{V} \rightarrow \rho = \frac{37,1}{4,71239} = 7,87 \text{ g/cm}^3$

Hoe lang moet je dit staafje maken als het 50 gram moet wegen?

- $\rho = \frac{m}{V} \rightarrow 7,87 = \frac{50}{V} \rightarrow V = 6,35324 \text{ cm}^3$
- $V = \pi r^2 \cdot \ell \rightarrow 6,35324 = \pi \cdot 0,5^2 \cdot \ell \rightarrow \ell = 8,09 \text{ cm}$

Dichtheid bij 20 °C

metaal	dichtheid (g / cm ³)
aluminium	2,70
bismut	9,80
cadmium	8,65
calcium	1,55
chroom	7,19
goud	19,3
ijzer	7,87
kalium	0,86
kobalt	8,9
koper	8,96
kwik	13,5
lood	11,3
magnesium	1,74
molybdeen	10,2
natrium	0,97
nikkel	8,90
platina	21,5
tantaal	16,7
tin	7,31
uraan	19,1
wolfraam	19,3
zilver	10,5
zink	7,2

vaste stof	dichtheid (g / cm ³)
acryl	1,2
been (bot)	1,9
cement (beton)	1,5 - 2,4
diamant	3,52
gips	2,32
glas (gewoon)	2,5 - 2,6
grafiet	2,1
hout (ebben-)	1,26
hout (eiken-)	0,78
hout (vuren-)	0,58
ijs (T = -4 °C)	0,917
keukenzout	2,17
kurk	0,20 - 0,35
nylon	1,14
paraffine	0,85
perspex	1,2
porselein	2,4
pvc	1,3
rubber	1,2 - 1,6
silicium	2,33
steen (bak-)	1,5 - 1,8
suiker	1,58
zand (droog-)	1,6

vloeistof	dichtheid (g / cm ³)
aceton	0,79
alcohol	0,80
benzine	0,72
chloroform	1,49
glycerol	1,26
olijfolie	0,92
stookolie	0,95
terpentijn	0,84
water	0,998
zeewater	1,024
zwaar water	1,105
zwavelzuur	1,84

gas T = 273 K	dichtheid (g / cm ³)
ammoniak	0,00077
argon	0,00178
chloor	0,00321
helium	0,000178
koolstofdioxide	0,001986
lucht (mengsel)	0,001293
methaan	0,00072
neon	0,00090
stikstof	0,00125
waterstof	0,000090
zuurstof	0,001105
zwaveldioxide	0,00293

4.5 Transport van warmte

Verplaatsing van warmte

De inwendige energie van een voorwerp verandert als het warmte opneemt of warmte afstaat. Warmte kan zich verplaatsen door **warmtegeleiding**, door **warmtestroming** en door **warmtestraling**. Om warmte te verplaatsen is een verschil in temperatuur nodig, want warmte verplaatst zich altijd van een hoge naar lage temperatuur. Als er geen temperatuurverschil is, is er ook geen verplaatsing van warmte. Dit is een heel belangrijk feit en hoort tot de kern van de **thermodynamica**.

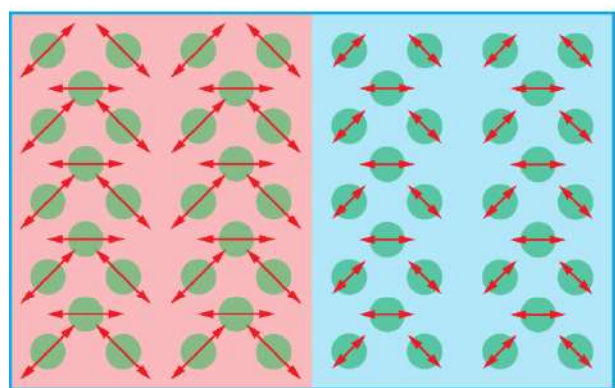
Warmte verplaatst zich spontaan van plaatsen met een hoge temperatuur naar plaatsen met een lage temperatuur.

Warmtegeleiding

Warmtegeleiding gebeurt als atomen met gemiddeld veel kinetische energie (hoge temperatuur) botsen tegen atomen met gemiddeld weinig kinetische energie (lage temperatuur). Stel dat een voorwerp aan de ene kant een hoge temperatuur heeft en aan de andere kant een lage temperatuur. Bij de kant met de hoge temperatuur hebben de atomen meer kinetische energie en als ze tegen atomen botsen met minder kinetische energie wordt er een beetje energie overgedragen. Hierdoor neemt de kinetische energie aan kant met de hoge temperatuur af en aan de kant met de lage temperatuur toe. Het transport van warmte houdt op als de temperatuur overal gelijk is.

Warmtegeleiding gebeurt omdat atomen tegen elkaar botsen. De atomen verplaatsen zich niet over een grote afstand.

In figuur 16 zie je hoe het werkt. Aan de linkerkant (rood) is de temperatuur hoog en trillen de atomen met een grote snelheid. Aan de rechterkant (blauw) is de temperatuur laag en hebben de atomen een lage snelheid. Op het grensvlak botsen atomen met grote snelheid tegen atomen met lage snelheid. Hierdoor worden de snelle atomen langzamer en de langzame atomen sneller. Als de temperatuur overal hetzelfde is wordt er geen warmte meer verplaatst.



Figuur 16 Warmtegeleiding.

Warmtestroming

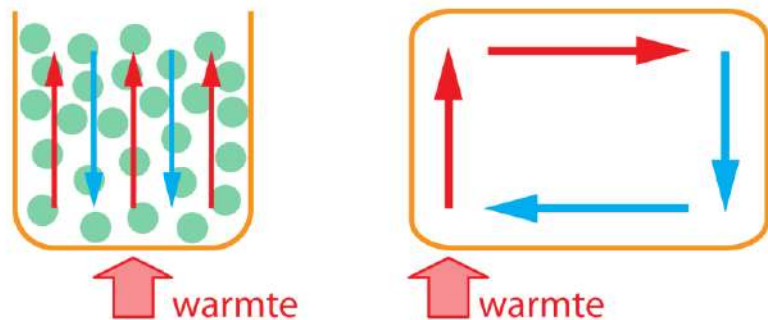
Bij warmtegeleiding verplaatsen atomen zich niet over een grote afstand. Ze botsen alleen maar tegen elkaar. Maar in een vloeistof of gas kunnen atomen wel over een grote afstand bewegen waardoor warmte kan worden verplaatst.

Warmtestroming gebeurt als atomen met veel energie zich over een grote afstand verplaatsen.

In een vaste stof kunnen atomen zich niet over een grote afstand verplaatsen en is warmtestroming niet mogelijk. Maar in een vloeistof of gas is het wel mogelijk. Dit kan bijvoorbeeld door **convectie**. Laten we kijken naar convectie in een vloeistof, maar in een gas werkt het net zo. Op de plaats waar warmte wordt opgenomen zet de vloeistof uit en neemt de dichtheid af. Verwarmde vloeistof met een lage dichtheid gaat drijven op koude vloeistof met een hoge dichtheid. Hierdoor ontstaat een opwaartse stroom van warme vloeistof. Bij het opstijgen van de verwarmde vloeistof zakt koude vloeistof naar beneden. Aangekomen bij de warmtebron wordt nu ook de koude vloeistof verwarmd. Er ontstaat een circulerende vloeistofstroom, waardoor warmte wordt getransporteerd van onder naar boven. Zie figuur 17.

Als een vat aan één kant wordt verwarmd gaat de vloeistof in een kring stromen. Vloeistof met een hoge temperatuur stijgt op en stroomt bovenin van de warmtebron weg. Vloeistof met lage temperatuur zinkt en stroomt onderin naar de warmtebron toe.

Figuur 17 Onderaan wordt de vloeistof verwarmd. Hierdoor zet de vloeistof uit en gaat het drijven op de koudere vloeistof.



Warmtestroming door convectie kan alleen als er zwaartekracht is. Als warmtestroming door convectie onvoldoende is kun je door te roeren warme en koude vloeistof met elkaar mengen. Bij het koken is dit heel normaal, waarbij je een houten lepel gebruikt om te voorkomen dat je door warmtegeleiding in de lepel je handen verbrand.

Warmtestraling

Behalve warmtegeleiding en warmtestroming kan een voorwerp ook warmtestraling uitzenden. Hoe dit precies werkt is moeilijk te begrijpen, maar het komt erop neer dat trillende atomen altijd straling uitzenden dat lijkt op licht. De kleur van dit licht hangt af van de temperatuur. Bij lage temperatuur wordt er infrarode straling uitgezonden wat onzichtbaar is, maar wat je wel kunt voelen op je huid. Als de temperatuur hoger wordt gaat het voorwerp rood gloeien en bij een nog hogere temperatuur wordt het "witheet". Zie figuur 18.

Het oppervlak van de zon heeft een temperatuur van $5500\text{ }^{\circ}\text{C}$ en zendt zichtbaar licht uit. Bij een hele hoge temperatuur wordt er gevaarlijke röntgenstraling uitgezonden.



Figuur 18 Gloeiende lava.

Een voorwerp zendt altijd warmtestraling uit. Hoe hoger de temperatuur is hoe meer straling er wordt uitgezonden. Ook de kleur van de straling is afhankelijk van de temperatuur: infrarood (20 °C) → rood (1000 °C) → wit (5500 °C).

Warmte-isolatie

Warmte-isolatie is het verhinderen van warmtetransport. Om ervoor te zorgen dat een voorwerp geen warmte verliest moeten alle vormen van warmtetransport worden geblokkeerd.

Isolatie tegen warmtegeleiding

- materialen gebruiken die slecht warmte geleiden (hout, glas, plastic, lucht)
- het contactoppervlak tussen het voorwerp en de omgeving klein te maken
- vacuüm aanbrengen, zodat er geen atomen zijn die tegen elkaar botsen

Isolatie tegen warmtestroming

- het stromen van vloeistof of gas afremmen door het aanbrengen van een poreus materiaal (vacht, jas, deken, glaswol)
- vacuüm aanbrengen, zodat er geen atomen zijn om te stromen

Isolatie tegen warmtestraling

- een (aluminium) reflector aanbrengen, waardoor het uitgezond licht wordt teruggekaatst

Figuur 19 Isolatie tegen
Links: warmtegeleiding
Midden: warmtestroming
Rechts: warmtestraling



4.6 Warmte opnemen en warmte afstaan

Verandering van inwendige energie

De inwendige energie van een voorwerp kan toenemen omdat een wrijvingskracht arbeid uitoefent of omdat het voorwerp warmte opneemt van een ander voorwerp. Dat laatste gebeurt als de temperatuur van het andere voorwerp hoger is én als warmtetransport door geleiding, stroming of straling mogelijk is. Deze paragraaf gaat over het opnemen en afstaan van warmte.

Soortelijke warmte

We zoeken een formule waarmee we kunnen uitrekenen hoeveel warmte er nodig is om de temperatuur van een voorwerp te laten stijgen. Om het eenvoudig te houden richten we ons op voorwerpen die van één stof zijn gemaakt, bijvoorbeeld van ijzer. We gaan er van uit dat de temperatuur van het voorwerp overal hetzelfde is. Om de verandering van de inwendige energie te berekenen doet de vorm van het voorwerp er niet toe. De atomen gedragen zich immers hetzelfde ook als het voorwerp er anders uitziet. Wat er wel toe doet is de hoeveelheid atomen en dus de massa van het voorwerp. Want als de temperatuur hetzelfde is heeft een ijzeren voorwerp van 3 kg drie keer zoveel inwendige energie als een ijzeren voorwerp van 1 kg. In de formule voor de verandering van inwendige energie moeten we rekening houden met:

- 1) de stof waarvan het voorwerp is gemaakt
- 2) de massa van het voorwerp
- 3) de verandering van de temperatuur

Voor de warmte Q die nodig is om de temperatuur met ΔT te veranderen geldt:

$$Q = c \cdot m \cdot \Delta T$$

- Q is de warmte die is opgenomen of is afgestaan (J)
- c is de soortelijke warmte (J / kg °C)
- m is de massa in kilogram (kg)
- ΔT is de verandering van de temperatuur in graden Celsius (°C)

In de formule staat de **soortelijke warmte (c)**. Dit is voor iedere stof anders en geeft aan hoeveel warmte er nodig is om de temperatuur van één kg stof één °C te laten stijgen.

De soortelijke warmte c is de hoeveelheid warmte die nodig is om de temperatuur van één kg stof één °C te laten stijgen.

De warmte die een voorwerp opneemt is afgestaan door een ander voorwerp. De wet van behoud van energie geeft aan dat de warmte die het voorwerp met hoge temperatuur afstaat gelijk is aan de warmte die het voorwerp met lage temperatuur opneemt.

$$Q_{\text{afstaan}} = Q_{\text{opnemen}}$$

Met dit inzicht en met de formule $Q = c \cdot m \cdot \Delta T$ kun je uitrekenen hoeveel warmte er wordt uitgewisseld tussen twee voorwerpen met een verschillende temperatuur, want het uitwisselen stopt als de temperatuur gelijk is.

VOORBEELD afkoelen van een hoefijzer

Om een hoefijzer te maken verwarmt de smid ijzer tot $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$, waardoor het roodgloeiend wordt. Als het de juiste vorm heeft wordt het ijzer in een emmer met 5 kg water van $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ gebracht. Het water warmt hierdoor op tot $21\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Hoeveel kilogram weegt het hoefijzer?

- $\Delta T_{\text{water}} = 21 - 8 = 13\text{ }^{\circ}\text{C}$ | $\Delta T_{\text{hoefijzer}} = 1200 - 21 = 1179\text{ }^{\circ}\text{C}$
- $Q_{\text{water}} = c_{\text{water}} \cdot m \cdot \Delta T = 4180 \cdot 5 \cdot 13 = 2,717 \cdot 10^5\text{ J}$
- $Q_{\text{hoefijzer}} = Q_{\text{water}}$ **wet van behoud van energie**
- $Q_{\text{hoefijzer}} = c_{\text{ijzer}} \cdot m \cdot \Delta T = 460 \cdot m \cdot 1179 = Q_{\text{water}} = 2,717 \cdot 10^5\text{ J}$
- $m \cdot 5,4234 \cdot 10^5 = 2,717 \cdot 10^5 \rightarrow m = 0,50\text{ kg}$

VOORBEELD warm water in een bad

Een bad is gevuld met 100 kilogram koud water van $12\text{ }^{\circ}\text{C}$. Een boiler levert warm water met een temperatuur van $80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Verwaarloos de warmte die nodig is om het bad te verwarmen.

Hoeveel liter warm water uit de boiler moet er worden toegevoegd om het badwater een temperatuur van $34\text{ }^{\circ}\text{C}$ te geven?

- $\Delta T_{\text{koud water}} = 34 - 12 = 22\text{ }^{\circ}\text{C}$ | $\Delta T_{\text{warm water}} = 80 - 34 = 46\text{ }^{\circ}\text{C}$
- $Q_{\text{koud water}} = c \cdot m \cdot \Delta T = 4180 \cdot 100 \cdot 22 = 9,196 \cdot 10^6\text{ J}$
- $Q_{\text{warm water}} = Q_{\text{koud water}}$ **wet van behoud van energie**
- $Q_{\text{heet water}} = 9,196 \cdot 10^6 = 4180 \cdot m \cdot 46 \rightarrow m = 47,826\text{ kg}$

Behalve twee voorwerpen met elkaar in contact te brengen kunnen we ook op een andere manier de inwendige energie van een voorwerp veranderen. Zo kunnen we een elektrisch verwarmingselement gebruiken, waarbij elektrische energie wordt omgezet in warmte. In een magnetronoven wordt elektrische energie eerst omgezet in warmtestraling die daarna door een voorwerp wordt opgenomen.

VOORBEELD water verwarmen in een magnetron

Een beker met 250 g water verwarm je in een magnetron van 15 °C tot 75 °C. Het verwarmen van de beker kost 10000 J. De magnetron heeft een vermogen van 900 W.

Hoeveelheid energie moet de magnetron leveren?

- $m = 0,25 \text{ kg} \mid c_{\text{water}} = 4180 \text{ J/kg}^\circ\text{C} \mid \Delta T = 75 - 15 = 60^\circ\text{C}$
- $Q_{\text{water}} = c \cdot m \cdot \Delta T = 4180 \cdot 0,25 \cdot 60 = 62700 \text{ J}$
- $E_{\text{totaal}} = Q_{\text{water}} + Q_{\text{beker}}$
- $E = 62700 + 10000 = 72700 \text{ J}$

Hoelang moet de magnetron aanstaan?

- $E = 72700 \text{ J} \mid P = 900 \text{ W} \mid t = \dots \text{s}$
- $E = P \cdot t \rightarrow 72700 = 900 \cdot t \rightarrow t = 80,77 = 81 \text{s}$

Soortelijke warmte bij 20 °C

metaal	soortelijke warmte (J / kg °C)
aluminium	880
beryllium	1800
bismut	120
cadmium	234
calcium	650
chroom	450
goud	129
ijzer	460
kalium	754
kobalt	420
koper	387
kwik	140
lood	128
magnesium	1026
molybdeen	260
natrium	1230
nikkel	460
platina	133
tantaal	140
tin	220
uraan	116
wolfraam	135
zilver	240
zink	386

vaste stof	soortelijke warmte (J / kg °C)
acryl	1400 – 2100
asfalt	920
cement (beton)	900 – 1100
diamant	490
gips	800 – 1100
glas (gewoon)	800
grafiet	690 – 720
hout (ebben-)	
hout (eiken-)	2390
hout (vuren-)	2720
ijs (T = -4 °C)	2200
keukenzout	880
koolstof	850
kurk	17000 – 21000
nylon	1700
paraffine	2100 – 2900
perspex	1500
porselein	800
pvc	1000 – 2000
rubber	1100 – 2000
silicium	760
steen (bak-)	750
suiker	1200
zand (droog-)	800

vloeistof	soortelijke warmte (J / kg °C)
aceton	2200
alcohol	2430
benzine	2100
chloroform	960
glycerol	2430
olijfolie	1650
siliconenolie	1370
terpentijn	1750
water	4180
zeewater	3930
zwaar water	4220
zwavelzuur	1380

gas bij constante druk	soortelijke warmte (J / kg °C)
ammoniak	2060
argon	520
chloor	490
helium	5100
koolstofdioxide	820
lucht (mengsel)	1000
methaan	2210
neon	1030
stikstof	1040
waterstof	14300
zuurstof	920
zwaveldioxide	640