

5 Stoffen en Materialen vwo

5.0 Overzicht

5.1 Vast, vloeibaar, gas en plasma

- Welke vier fasen (verschijningsvormen) zijn er?
- Wanneer is een stof vast, wanneer vloeibaar en wanneer gasvormig?
- Wanneer heeft een stof een plasma-fase?
- Hoe heten de faseovergangen van vast ↔ vloeibaar ↔ gas ↔ vast?
- Wat is de dichtheid van een stof?
- Wat is het symbool voor dichtheid en wat is de eenheid van dichtheid?
- Met welke formule bereken je de dichtheid?
- Wat heeft drijven, zinken of zweven met de dichtheid te maken?
- Waarom drijft ijs op water?

5.2 Inwendige energie

- Wat is de inwendige energie van een stof?
- Wat gebeurt er als je warmte aan een stof toevoegt?
- Wat hebben warmte en temperatuur met elkaar te maken?
- Wanneer blijft de temperatuur hetzelfde als je warmte toevoegt?
- Hoe reken je de temperatuur om van graden celsius naar kelvin en omgekeerd?
- Wat is de stookwaarde van een stof en wat is de eenheid van stookwaarde?
- Wat is warmtegeleiding?
- Hoe bereken je de warmtegeleiding door een wand?
- Wat is de warmtegeleidingscoëfficiënt en welke eenheid heeft dit?
- Wat is warmtestroming?
- Wat is convectie?
- Wat is warmtestraling?
- Hoe verandert de kleur van uitgestraald licht als de temperatuur toeneemt?
- Wat is warmte-isolatie?
- Hoe kun je warmtegeleiding, warmtestroming en warmtestraling tegengaan?

5.3 Warmte opnemen en warmte afstaan

- Hoe verandert de temperatuur als je warmte toevoegt of onttrekt aan een stof?
- Wat is de soortelijke warmte van een stof?
- Wat is het symbool voor soortelijke warmte en wat is de eenheid hiervan?
- Hoe hangen de dichtheid en de soortelijke warmte van metalen met elkaar samen?
- Wat is de warmtecapaciteit van een voorwerp?
- Wat is het symbool voor warmtecapaciteit en wat is de eenheid hiervan?
- Waarom verandert de temperatuur niet als een stof smelt of verdampt?
- Wat is smeltwarmte en wat is verdampingswarmte en welke eenheid hebben ze?

5.4 Warmte en elektrische geleiding

- Wat geeft de soortelijke geleidbaarheid aan?
- Hoe bereken je de soortelijke geleidbaarheid uit de soortelijke weerstand?
- Wat zie je als je de soortelijke geleidbaarheid uitzet tegen de warmtegeleidingscoëfficiënt?
- Hoe verklaar je het verband tussen de soortelijke geleidbaarheid en de warmtegeleidingscoëfficiënt?

5.5 Spanning en rek

- Wat is de spanning en wat is de eenheid van spanning?
- Wat is de rek?
- Waarom heeft rek geen eenheid?
- Wat staat er uit in een (spanning, rek)-diagram?
- Wat is de vloeispanning, de treksterkte en de breukspanning?
- Wanneer vindt er insnoering plaats?
- Wat is de elasticiteitsmodulus en welke eenheid heeft de elasticiteitsmodulus?
- Hoe bepaal je de elasticiteitsmodulus uit een (spanning, rek)-diagram?
- Wat is het verschil tussen de elasticiteitsmodulus en de veerconstante?

5.1 Vast, vloeibaar gas en plasma

De fasen van een stof

De meeste stoffen hebben vier verschijningsvormen of fasen: de **vaste-fase**, de **vloeibare-fase**, de **gasvormige-fase** en de **plasma-fase**. De plasma-fase wordt vaak over het hoofd gezien. Dit is onterecht want TL- en spaarlampen zijn alledaagse gebruiksvoorwerpen, waarin een stof in de plasma-fase licht uitstraalt.

– vaste fase –

In de vaste fase zijn de atomen of moleculen stevig aan elkaar gebonden en dicht op elkaar gestapeld. Meestal zijn de atomen gerangschikt in een regelmatig rooster (patroon). De atomen trillen om een vaste plaats. Als er energie aan een vaste stof wordt toegevoegd wordt de afstand tussen de atomen groter en gaan de atomen met een grotere snelheid trillen.

– vloeibare fase –

In de vloeibare fase zijn de atomen of moleculen zwak aan elkaar gebonden. De afstand tussen de atomen is groter dan in de vaste-fase, waardoor ze langs elkaar heen kunnen bewegen. Net als bij vaste stoffen wordt de afstand tussen de atomen groter en gaan de atomen harder trillen als er energie wordt toegevoegd. Water vertoont uitzonderlijk gedrag, omdat het krimpt tijdens het smelten in plaats van uitzet. Verder in deze paragraaf lees je hier meer over.

– gas fase –

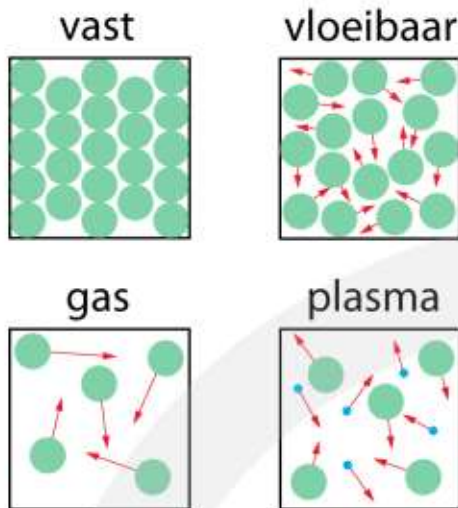
In de gas fase zijn de atomen of moleculen niet aan elkaar gebonden maar bewegen ze kriskras door de ruimte. In een gas is de afstand tussen de atomen veel groter dan in de vloeibare fase. Hierdoor zijn de krachten die atomen op elkaar uitoefenen vrijwel nul. Omdat de moleculen in een gas elkaar niet aantrekken verspreidt een gas zich spontaan over de hele ruimte.

– plasma fase –

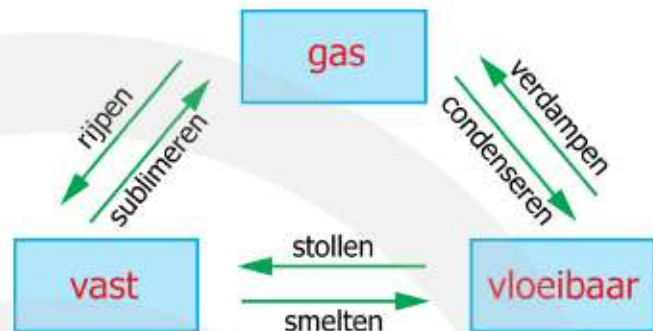
Ook bij de plasma fase bewegen de atomen kriskras door de ruimte. Het verschil met de gas fase is dat bij een plasma de atomen één of meer elektronen zijn kwijtgeraakt. In figuur 1 zijn de rode stippen rondvliegende elektronen. Een plasma is een mengsel van een gas van ionen en een gas van elektronen. Elektronen botsen voortdurend tegen de ionen, waarbij energie in de vorm van licht wordt uitgestraald. Plasma's geven daarom altijd licht. Vuur is een plasma. Ook in een TL-buis en in een spaarlamp is een plasma aanwezig.

Faseovergangen

Als de fase van een stof verandert spreek je van een faseovergang. In figuur 2 vind je de namen van de overgangen tussen de vaste-, de vloeibare- en de gasfase. Omdat de plasmafase minder bekend is zijn er in het Nederlands geen speciale namen voor de overgangen van en naar de plasmafase.



Figuur 1
De vier fasen van een stof.



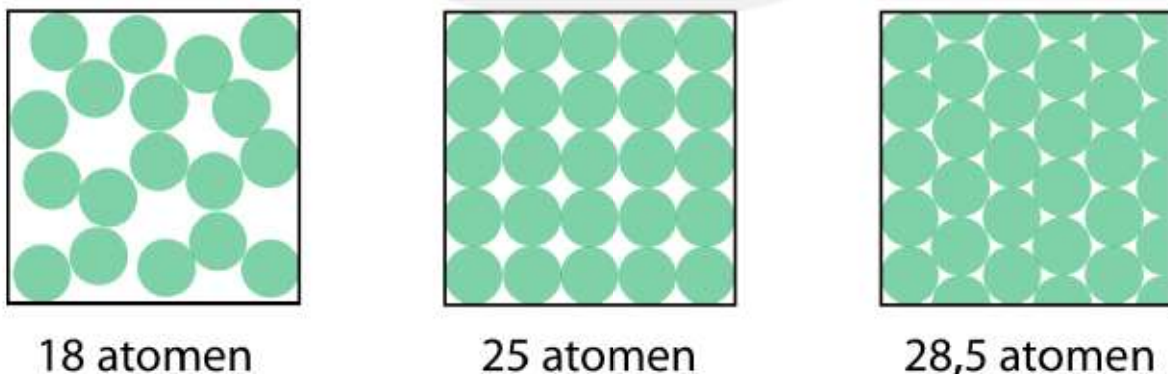
Figuur 2
Namen van faseovergangen tussen de vaste-, de vloeibare- en de gasvormige fase.

Dichtheid

De massa van een voorwerp geeft aan uit hoeveel materie het bestaat. Hoe zwaar een voorwerp is hangt af van de hoeveelheid atomen én van de massa van deze atomen. Passen er veel zware atomen in een klein volume, dan is een klein voorwerp zwaar. Zo is een blokje lood behoorlijk zwaar, omdat het uit zware atomen bestaat die dicht op elkaar zitten. Een grote blok piepschuim is helemaal niet zwaar omdat er veel ruimte tussen de atomen zit.

De dichtheid geeft aan hoeveel massa er in een bepaald volume zit. Hierbij zijn twee dingen belangrijk: 1) de gemiddelde afstand tussen de atomen, 2) de atoommassa.

In figuur 3 zie je steeds hetzelfde volume gevuld met dezelfde atomen. De tekening is een plat vlak, maar in werkelijkheid is het volume driedimensionaal. Links is een losse stapeling van atomen. In het midden liggen de atomen tegen elkaar aan. Rechts zijn de atomen het meest efficiënt gestapeld. We concluderen dat links de dichtheid het kleinst is en rechts het grootst.



Figuur 3 Stapeling van atomen

Voor de dichtheid geldt de volgende formule:

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

- ρ is de dichtheid in kilogram per kubieke meter (kg / m^3) (ρ "rho" Griekse letter)
- m is de massa in kilogram (kg)
- V is het volume in kubieke meter (m^3)

– dichtheid in gram per kubieke centimeter –

Soms wordt ook gram per kubieke centimeter (g/cm^3) gebruikt als eenheid voor de dichtheid. Je mag zelf kiezen welke eenheid je het handigst vindt. Als je moet je omrekenen van kilogram per kubieke meter (kg/m^3) naar gram per kubieke centimeter (g/cm^3) gebruik je:

$$1 \text{ g} / \text{cm}^3 = 1000 \text{ kg} / \text{m}^3$$

BEWIJS

- $100 \times 100 \times 100 = 1.000.000$ (één miljoen) cm^3 in één m^3
- $1 \text{ g}/\text{cm}^3$ geeft $1.000.000$ gram in één m^3
- $1000 \text{ gram} = 1 \text{ kg} \rightarrow 1 \text{ g}/\text{cm}^3 = 1000 \text{ kg}$ in één m^3

VOORBEELD

Een blokje metaal heeft een massa van $52,5 \text{ g}$ en een volume van $5,0 \text{ cm}^3$

Bereken de dichtheid van het metaal in g/cm^3 .

- $m = 52,5 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \quad | \quad V = 5,0 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \quad | \quad \rho = \dots \text{ kg}/\text{m}^3$
- $\rho = \frac{m}{V} \rightarrow \rho = \frac{52,5 \cdot 10^{-3}}{5,0 \cdot 10^{-6}} = 10,5 \cdot 10^3 \text{ kg}/\text{m}^3$

Zoek op van welk metaal het blokje gemaakt is.

- het blokje is van zilver, want zilver heeft een dichtheid van $10,5 \cdot 10^3 \text{ kg}/\text{cm}^3$

Drijven en zinken

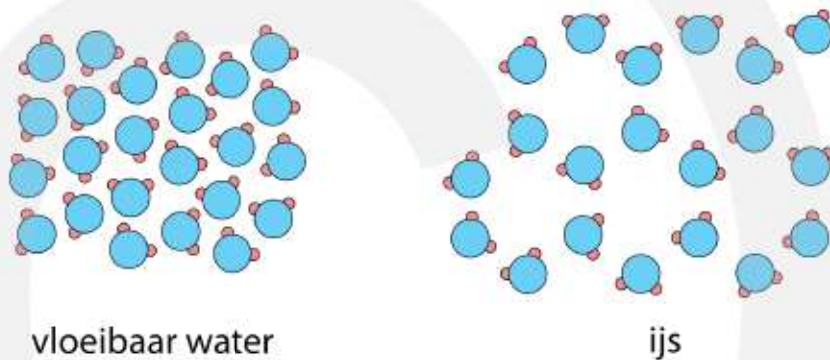
Als je iets in het water gooit gaat het soms **drijven** en soms **zinken**. Voorwerpen van hout of kurk blijven drijven, voorwerpen van steen of ijzer zinken meestal. Dit heeft te maken met de dichtheid. Is de dichtheid van een voorwerp kleiner dan de dichtheid van water dan gaat het voorwerp drijven. Is de dichtheid groter, dan gaat het zinken. Als de dichtheid precies hetzelfde is als de dichtheid van water gaat het voorwerp **zweven**. Het stijgt niet op en zakt niet naar de bodem, maar blijft op dezelfde hoogte.

ρ_{stof}	kleiner dan	ρ_{water}	→	stof blijft drijven
ρ_{stof}	gelijk aan	ρ_{water}	→	stof gaat zweven
ρ_{stof}	groter dan	ρ_{water}	→	stof gaat zinken

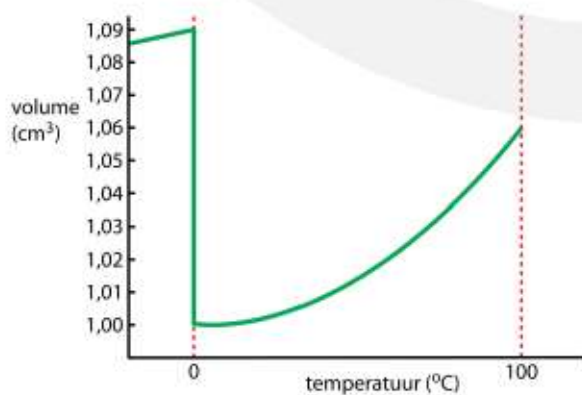
Water en ijs

De dichtheid van ijs bij een temperatuur van $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ is $0,917\text{ g/cm}^3$. Vlak boven het nulpunt heeft water een dichtheid van $0,998\text{ g/cm}^3$. Dit betekent dat ijs tijdens het smelten niet uitzet maar krimpt en dat water bij het bevriezen uitzet. Het gevolg is dat ijs op het smeltwater drijft. Gelukkig maar, want anders zouden we nooit kunnen schaatsen en zou het ijs van de Noordpool op de bodem van de oceaan liggen.

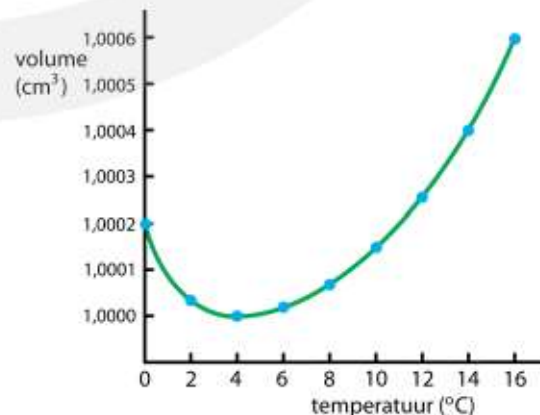
Figuur 4
Water zet uit als het bevroert.
 $\rho_{\text{ijs}} < \rho_{\text{water}}$
zodat ijs op water drijft.



De dichtheid van ijs is lager dan die van water omdat bij het bevriezen de watermoleculen zich in ringen van zes gaan ordenen. Zie figuur 4. Hierdoor nemen ze meer ruimte in, waardoor water tijdens het bevriezen uitzet. In figuur 5 is het volume van één gram water uitgezet tegen de temperatuur en zie je de af van het volume bij het smelten van ijs. In figuur 6 zie je hoe het volume van één gram water verandert als je de temperatuur verhoogt van 0 tot $16\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tussen 0 en $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ neemt het volume af, omdat de ringen van watermoleculen kapotgaan. Hierdoor wordt de dichtheid groter. Tussen 4 en $16\text{ }^{\circ}\text{C}$ neemt het volume toe en zet het water uit, waardoor de dichtheid weer kleiner wordt.



Figuur 5
Het volume van 1 gram water is uitgezet tegen de temperatuur.

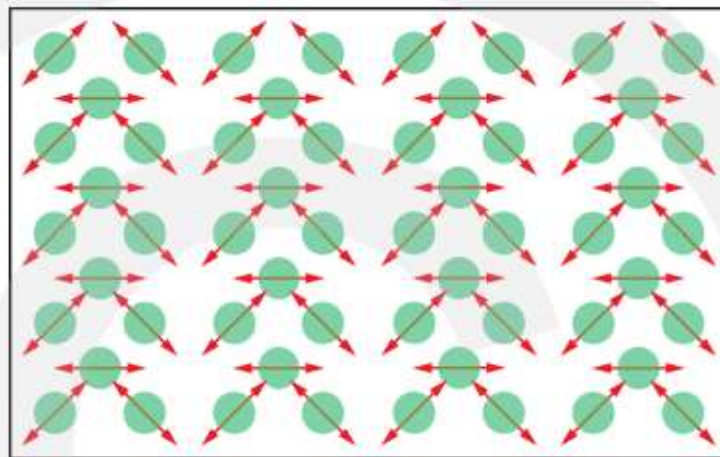


Figuur 6
Tussen 0 en $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ krimpt water bij het verhitten. Boven $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ zet water, net als de meeste andere stoffen uit.

5.2 Inwendige energie

Warmte en temperatuur

Atomen zijn altijd aan het trillen. Voortdurend trekken ze elkaar aan of stoten ze elkaar af. In een vaste stof zijn de atomen gestapeld in een vast patroon, het atoomrooster. De atomen trillen daarom op een regelmatige manier. Zie figuur 7.



Figuur 7
Trillende atomen in
een vaste stof.

Omdat atomen elkaar afstoten en aantrekken und daarbij voortdurend trillen, bevat een stof energie. Dit noemen we de **inwendige energie** van een stof. Deze inwendige energie kun je groter maken door **warmte** toe te voegen. De warmte die je toevoegt is gelijk aan de toename van de inwendige energie.

Inwendige energie bestaat uit twee soorten energie: **(chemische) bindingsenergie** en **kinetische energie**. Bindingsenergie is aanwezig doordat atomen elektrische krachten op elkaar uitoefenen. De positief geladen atoomkernen stoten elkaar af, de negatief geladen elektronen stoten elkaar ook af. Maar atoomkernen en elektronen trekken elkaar aan, en dit zorgt ervoor dat de atomen dicht bij elkaar gaan zitten. Om de afstand tussen de atomen te vergroten en daarmee de bindingen losser te maken, moet er arbeid op de atomen worden verricht. Behalve bindingsenergie is er ook kinetische energie aanwezig, omdat atomen voortdurend trillen en dus snelheid hebben.

Een stof bevat inwendige energie omdat:

- de atomen krachten op elkaar uitoefenen (bindingsenergie)
- de atomen trillen (kinetische energie)

Als de atomen met een grotere snelheid gaan trillen neemt de temperatuur van de stof toe. De **temperatuur** is gerelateerd **gemiddelde kinetische energie** van de atomen. Hoe hoger de temperatuur is hoe groter de kinetische energie en dus hoe groter de gemiddelde snelheid. In het Nederlands wordt "warmte" en "temperatuur" vaak als synoniem gebruikt, maar dat is niet terecht. Het zijn verschillende grootheden met verschillende natuurkundige eigenschappen.

Temperatuur is gerelateerd aan de gemiddelde kinetische energie van de trillende atomen.

Als warmte aan een stof wordt toegevoegd kan de inwendige energie op twee manieren toenemen.

- 1) **de afstand tussen de atomen én de snelheid van de atomen neemt toe**
- 2) **alleen de afstand tussen de atomen neemt toe, de snelheid blijft gelijk**

Mogelijkheid 1 komt het vaakst voor. Bij het verwarmen zet de stof uit (toename van de afstand) en de temperatuur wordt hoger (toename van de snelheid). Mogelijkheid 2 treedt op bij een **faseovergang**. Tijdens het smelten of koken neemt de afstand tussen de atomen toe, maar blijft de temperatuur gelijk. Alle warmte wordt gebruikt om de chemische bindingen losser te maken.

Hoewel warmte en temperatuur verschillende grootheden zijn hebben ze wel met elkaar te maken, want warmte stroomt altijd spontaan van plaatsen met een hoge temperatuur naar plaatsen met een lage temperatuur.

Warmte stroomt spontaan van plaatsen met een hoge temperatuur naar plaatsen met een lage temperatuur.

Dit is als volgt te verklaren. Stel dat de temperatuur niet overal hetzelfde is. Gebied H heeft een hoge temperatuur en gebied L een lagere temperatuur. H en L liggen vlak naast elkaar.

- bij H bewegen de atomen sneller dan bij L
- atomen van gebied H botsen met meer kracht tegen de atomen van L dan omgekeerd
- bij H verliezen de atomen snelheid en bij L krijgen atomen er snelheid bij
- bij H wordt de temperatuur lager en bij L wordt de temperatuur hoger
- warmte is verplaatst van gebied H naar gebied L

De eenheid Kelvin voor temperatuur

De eenheid voor temperatuur die in de natuurkunde het meest wordt gebruikt is de **Kelvin**. Een temperatuurverschil van één graad Celsius is ook een temperatuurverschil van één Kelvin. Het nulpunt van de Kelvinschaal ligt op $-273,15\text{ °C}$, omdat dit de laagste temperatuur is die theoretisch bereikt kan worden. De temperatuur van $-273,15\text{ °C}$ is het **absolute nulpunt**. Het enige verschil tussen de Celsiusschaal en de Kelvinschaal is de ligging van het nulpunt. Bij de Celsiusschaal is dit het smeltpunt van ijs en bij de Kelvinschaal is dit het absolute nulpunt.

Kelvin (K)	(smeltend ijs $273,15\text{ K}$ kokend water $373,15\text{ K}$)
Celsius (°C)	(smeltend ijs 0 °C kokend water 100 °C)

Temperatuur heeft als symbool T (hoofdletter) en als eenheid K.

De Kelvinschaal is gebaseerd op het absolute nulpunt van temperatuur. Anders dan vaak wordt beweerd is de kinetische energie van atomen bij het absolute nulpunt niet gelijk aan nul. Ook bij het absolute nulpunt zijn de atomen aan het trillen, hetgeen een opmerkelijke conclusie is uit de kwantummechanica.

Omrekenen van °C naar Kelvin en omgekeerd gaat als volgt:

$$\begin{aligned} \text{temperatuur in Kelvin} &= \text{temperatuur in } ^\circ\text{C} + 273,15 \\ \text{temperatuur in } ^\circ\text{C} &= \text{temperatuur in Kelvin} - 273,15 \end{aligned}$$

Stookwaarde (verbrandingswarmte)

Bij het verbranden gaan de atomen van een stof een verbinding met zuurstof aan. Bij deze chemische reactie komt energie vrij. De vrijgekomen energie kun je gebruiken om je huis te verwarmen, je auto te laten rijden, of elektriciteit op te wekken. De hoeveelheid warmte die vrijkomt per kg (vaste stof) of per kubieke meter (vloeistoffen en gassen) is de **stookwaarde** van een stof.

De stookwaarde is de hoeveelheid warmte die vrijkomt bij het verbranden van een stof. De eenheid van stookwaarde is:

- joule per kilogram (J/kg) voor vaste stoffen
- joule per kubieke meter (J/m³) voor vloeistoffen en voor gassen

Om de energie uit te rekenen die vrijkomt bij het verbranden van één kilogram vaste stof of één kubieke meter vloeistof of gas gebruik je de volgende formules.

$$\begin{aligned} \text{Vaste stof} & \quad E_{\text{ch}} = r_m \cdot m \\ \text{Vloeistof of gas} & \quad E_{\text{ch}} = r_v \cdot V \end{aligned}$$

- E_{ch} is de chemische energie die vrijkomt bij het verbranden in joule (J)
- r_m is de stookwaarde van de vaste stof in joule per kilogram (J/kg)
- m is de massa van de vaste stof in kilogram (kg)
- r_v is de stookwaarde van de vloeistof (gas) in joule per kubieke meter (J/m³)
- V is het volume van de vloeistof (gas) in kubieke meter (m³)

VOORBEELD

Een gemiddeld Nederlands gezin gebruikt $1,85 \cdot 10^3 \text{ m}^3$ Gronings aardgas per jaar om het huis te verwarmen en te koken. Stel dat in plaats van aardgas hout wordt gebruikt.

Hoeveel kg hout heeft een gemiddeld Nederlands gezin dan nodig?

- stookwaarde aardgas is $32 \cdot 10^6 \text{ J/m}^3$ | stookwaarde hout is $16 \cdot 10^6 \text{ J/kg}$
- energiegebruik: $E = 1,85 \cdot 10^3 \cdot 32 \cdot 10^6 = 5,92 \cdot 10^{10} \text{ J}$
- hoeveelheid hout: $\frac{5,92 \cdot 10^{10}}{16 \cdot 10^6} = 3,7 \cdot 10^3 \text{ kg}$

Een eikenboom heeft een diameter van 1,0 meter. Eikenhout heeft een dichtheid van $0,78 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$.

Hoe hoog moet deze boom zijn om één Nederlands gezin een jaar van energie te voorzien?

- $m = 3,7 \cdot 10^3 \text{ kg}$ | $\rho = 0,78 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ | $V = \dots \text{ m}^3$
- $\rho = \frac{m}{V}$
- $0,78 \cdot 10^3 = \frac{3,7 \cdot 10^3}{V} \rightarrow V = \frac{3,7 \cdot 10^3}{0,78 \cdot 10^3} = 4,7436 \text{ m}^3$
- $V = 4,7436 \text{ m}^3$ | $r = 0,50 \text{ m}$ | $\ell = \dots \text{ m}$
- inhoud cilinder: $V = \pi r^2 \cdot \ell$
- $4,7436 = \pi \cdot 0,5^2 \cdot \ell \rightarrow \ell = 6,0397 = 6,0 \text{ m}$

Transport van warmte

Transport van warmte kan op drie verschillende manieren gebeuren, door **warmtegeleiding**, door **warmtestroming** en door **warmtestraling**.

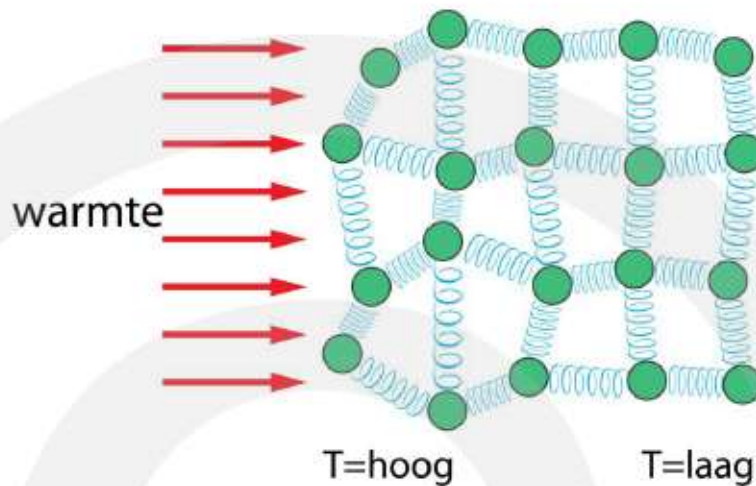
– warmtegeleiding –

Warmte wordt getransporteerd doordat atomen tegen elkaar botsen. De atomen geven kinetische energie aan elkaar door.

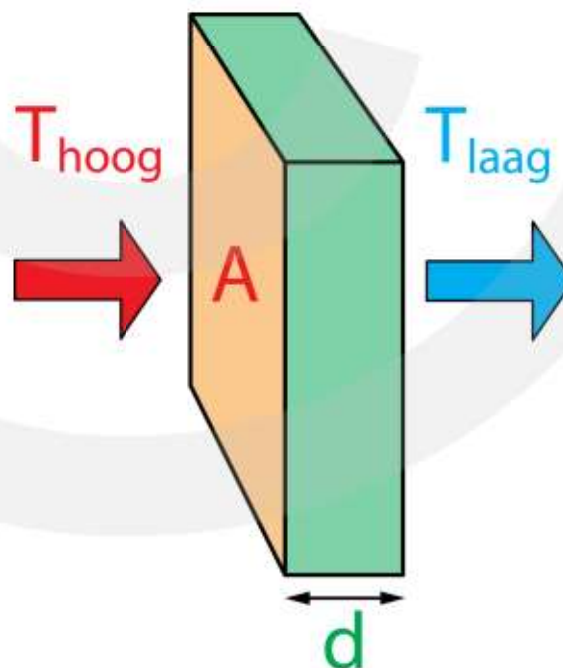
Als van een staaf uiteinde A een hoge temperatuur heeft en uiteinde B een lage temperatuur, dan stroomt er spontaan warmte van A naar B. De snelheid waarmee warmtegeleiding plaatsvindt hangt af van het temperatuurverschil én van het materiaal waarvan de staaf is gemaakt. Metalen zijn goede warmtegeleiders terwijl hout, glas en plastic slechte warmtegeleiders zijn.

Bij warmtegeleiding wordt warmte getransporteerd door overdracht van kinetische energie tussen naburige atomen. Atomen met veel kinetische energie staan energie af aan atomen met minder kinetische energie. Zodra de temperatuur in de staaf overal gelijk is stopt dit proces.

Figuur 8
Warmtegeleiding.
Waar warmte naar binnen stroomt neemt de kinetische energie van de atomen toe. Deze energie wordt overgedragen naar plaatsen waar het kouder is.



Als een ruimte met een hoge temperatuur door een wand is gescheiden van een ruimte met een lage temperatuur verplaatst warmte zich door de wand van de hoge temperatuur naar de lage temperatuur. Zie figuur 9.



Figuur 9
Warmtegeleiding door een wand met dikte d .

De snelheid waarmee warmtegeleiding door een wand plaatsvindt wordt bepaald door vier factoren:

- het materiaal waarvan de wand is gemaakt
- de oppervlakte waardoor de warmte gaat
- het temperatuurverschil
- de dikte van de wand

Dit geeft de volgende formule.

$$P = \lambda \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{d}$$

- P is het vermogen: de warmte-energie per seconde in (J/s) of in watt (W)
- λ is de warmtegeleidingscoëfficiënt in watt per meter per kelvin ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)
- A is de oppervlakte in vierkante meter (m^2)
- ΔT is het temperatuurverschil ($T_{\text{hoog}} - T_{\text{laag}}$) in kelvin of in $^{\circ}\text{C}$
- d is de dikte van de wand in meter (m)

VOORBEELD

Vensterglas heeft een warmtegeleidingscoëfficiënt van $0,90 \text{ W m}^{-1} \text{K}^{-1}$. Een glazen raam heeft een dikte van 5,0 mm. Op een dag is het binnen $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ en buiten $-5,0 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Bereken hoeveel warmte-energie er per uur door een raam van 2,5 bij 1,6 meter door het raam naar buiten gaat.

- $A = 2,5 \cdot 1,6 = 4,0 \text{ m}^2$
- $\lambda = 0,90 \text{ W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ | $A = 4,0 \text{ m}^2$ | $d = 5,0 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ | $P = \dots \text{ W}$
- $P = \lambda \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{d}$
- $P = 0,9 \cdot 4 \cdot \frac{25}{5 \cdot 10^{-3}} = 1,8 \cdot 10^4 \text{ W}$
- per uur: $E = P \cdot t$
- $E = 1,8 \cdot 10^4 \cdot 60 \cdot 60 = 6,48 \cdot 10^7 \text{ J}$

Bereken hoeveel kubieke meter (Gronings) aardgas hiervoor moet worden verbrand.

- stookwaarde aardgas is $32 \cdot 10^8 \text{ J/m}^3$
- hoeveelheid $\text{m}^3 = \frac{6,48 \cdot 10^7}{32 \cdot 10^8} = 2,025 = 2,0 \text{ m}^3$

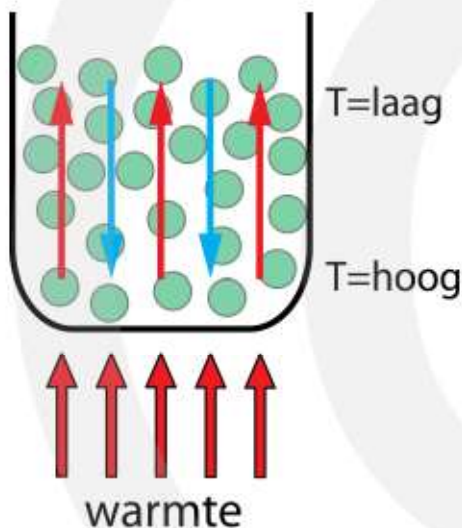
– warmtestroming –

Bij warmtestroming verplaatsen atomen met veel energie zich van plaatsen met een hoge- naar plaatsen met een lage temperatuur.

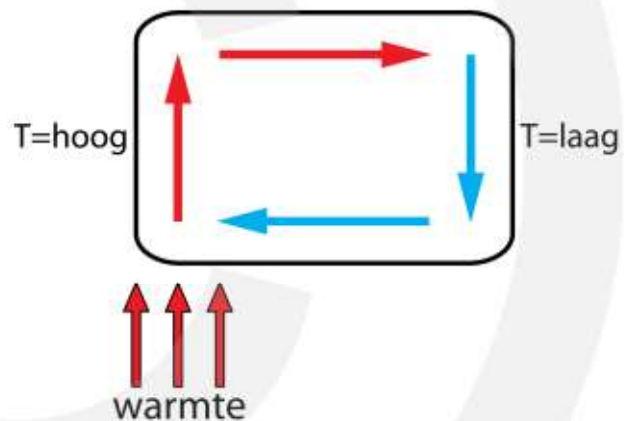
Warmtestroming is alleen mogelijk als atomen over een grote afstand kunnen verplaatsen.

In een vloeistof of gas, stromen atomen met veel energie, tegen de zwaartekracht in, naar boven. Deze vorm van warmtetransport heet **convectie**. Convectie werkt als volgt. Op de plaats waar warmte wordt opgenomen zet de stof uit en neemt de dichtheid af. Verwarmde vloeistof (gas) met een lage dichtheid gaat drijven op koude vloeistof (gas) met een hoge dichtheid. Hierdoor ontstaat er een opwaartse stroom van warme vloeistof (gas). Bij het opstijgen van de verwarmde vloeistof (gas) zakt de koude vloeistof (gas) naar beneden. Aangekomen bij de warmtebron wordt nu ook de koude vloeistof (gas) verwarmd. Er ontstaat een circulerende vloeistof- of gasstroom, waardoor warmte wordt getransporteerd van onder naar boven. Zie figuur 10.

Als een vat maar aan één kant wordt verwarmd gaat de vloeistof (gas) in een kring stromen. Zie figuur 11. 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 10
Onderaan stroomt warmte naar binnen. Hierdoor zet de vloeistof onderin uit en gaat drijven op de koudere vloeistof.



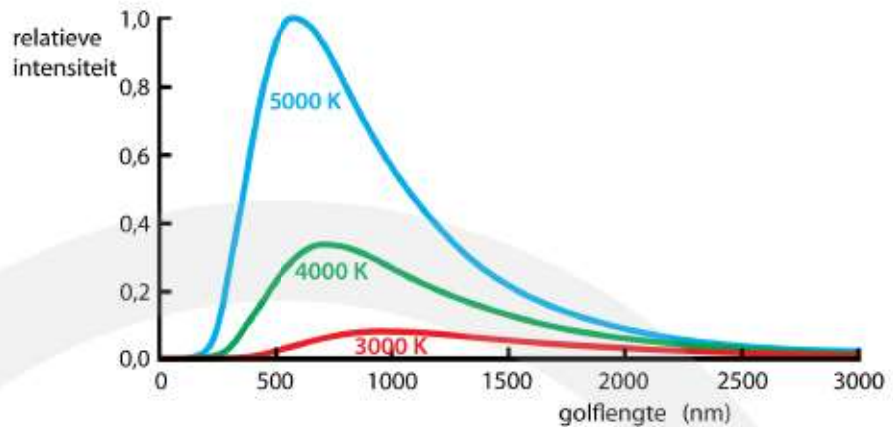
Figuur 11
Vanwege convectie gaat vloeistof of gas in een kring stromen.

Warmtestroming door convectie treedt alleen op als er zwaartekracht is. Zonder zwaartekracht is er geen convectie. Als warmtestroming door convectie niet of onvoldoende plaatsvindt moet er worden geroerd. Door te roeren wordt verwarmde en koude vloeistof (gas) met elkaar vermengd.

– warmtestraling –

Bij een lage temperatuur wordt infrarode straling, IR-straling, uitgezonden. IR-straling kun je niet zien, omdat onze ogen er ongevoelig voor zijn, maar je kunt het wel voelen op je huid. Als de temperatuur stijgt, krijgen de uitgezonden lichtdeeltjes (fotonen) steeds meer energie én worden er per seconde meer fotonen uitgezonden. Dit verschijnsel is te zien als metaal wordt verwarmd. Als de temperatuur hoog genoeg is gaat het metaal rood gloeien. Bij een nog hogere temperatuur verschuift de kleur naar blauw en wordt het metaal "witheet". Zie figuur 12/

Figuur 12
Elektromagnetische straling wordt altijd uitgezonden. Als de temperatuur toeneemt wordt de hoeveelheid straling groter en schuift het de uitgezonden kleur van rood naar blauw.



Een voorwerp zendt voortdurend warmte uit in de vorm van straling. Bij hoge temperatuur wordt er meer straling uitgezonden dan bij lage temperatuur.

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 de uitgezonden fotonen worden teruggekaatst

5.3 Warmte opnemen en warmte afstaan

Soortelijke warmte

Als er warmte wordt toegevoegd aan een vaste stof, een vloeistof of een gas, dan stijgt hierdoor de temperatuur, tenzij er een faseverandering optreedt. De toegevoegde warmte wordt opgeslagen als inwendige energie.

Als warmte Q wordt opgenomen door een hoeveelheid stof met massa m verandert de temperatuur. Deze verandering ΔT bereken je met de volgende formule.

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

- Q is de toegevoegde of onttrokken warmte (J)
- c is de soortelijke warmte ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$) of ($\text{J kg}^{-1} \text{°C}^{-1}$)
- m is de massa in kilogram (kg)
- ΔT is de verandering van de temperatuur in Kelvin of in graden Celsius (K of °C)

In de formule komt de **soortelijke warmte** voor. Deze grootheid 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.

Dichtheid en soortelijke warmte

Als je bij metalen de dichtheid vergelijkt met de soortelijke warmte dan valt het op dat metalen met een **kleine dichtheid** een **grote soortelijke warmte** hebben. De reden hiervan is de manier waarop warmte wordt opgeslagen als inwendige energie. Zoals we hebben gezien bestaat inwendige energie uit bindingsenergie en uit kinetische energie van de trillende atomen.

Het verschil in dichtheid wordt bij metalen vooral bepaald door de massa van de atomen. De grootte van de atomen is vrijwel gelijk. Zo heeft aluminium een massa van 27 u en een atoomstraal van 143 pm. Lood heeft een atoommassa van 207 u en een atoomstraal van 175 pm. In één kg aluminium zitten daarom veel meer atomen dan in één kg lood. Als één kg aluminium één graad in temperatuur stijgt, dan verandert de bindingsenergie van meer atomen en moeten er meer atomen een grotere snelheid te krijgen dan bij één kg lood. Vandaar dat metalen met een kleine dichtheid een grote soortelijke warmte hebben.

Warmtecapaciteit

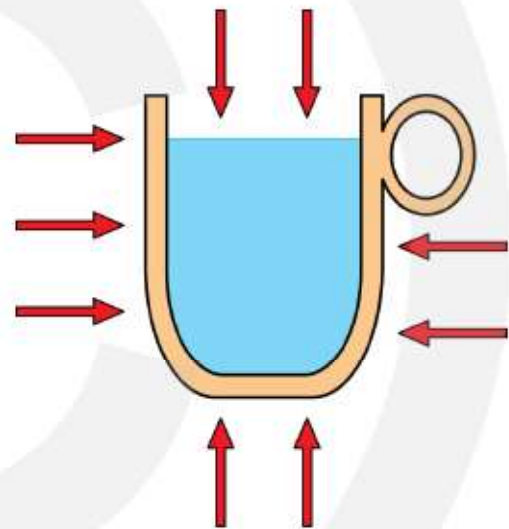
Als water in een beker wordt verwarmd stijgt niet alleen de temperatuur van het water maar ook die van de beker. Niet alle warmte wordt toegevoegd aan het water, een deel gaat naar de beker. Omdat de beker uit verschillende materialen bestaat wordt een nieuwe grootheid gebruikt: de **warmtecapaciteit**. De warmtecapaciteit is voor ieder voorwerp anders en kan dus niet worden opgezocht in een tabellenboek.

De warmtecapaciteit C is de hoeveelheid warmte die nodig is om een bepaald voorwerp één °C in temperatuur te laten stijgen.

$$Q = C \cdot \Delta T$$

– C is de warmtecapaciteit (J / °C) of (J / K) (hoofdletter C)

In figuur 13 zie je hoe de toegevoegde warmte wordt verdeeld tussen het water en de beker. Omdat het water en de beker met elkaar in contact staan hebben ze steeds **dezelfde temperatuur**.



Figuur 13
Warmte wordt toegevoegd aan een beker met water. Een deel van de warmte wordt opgenomen door het water. De rest wordt opgenomen door de beker.

VOORBEELD het verwarmen van een beker water

Een beker met 200 g water wordt in een magnetron verwarmd van 15 °C tot 75 °C. De magnetron heeft een vermogen van 800 W. De warmtecapaciteit van de beker is 150 J K⁻¹.

Bereken de hoeveelheid energie die de magnetron moet leveren.

- $E = Q_{\text{water}} + Q_{\text{beker}}$ (wet van behoud van energie)
- $Q_{\text{water}} = c \cdot m \cdot \Delta T = 4,18 \cdot 10^3 \cdot 0,200 \cdot (75 - 15) = 5,016 \cdot 10^4 \text{ J}$
- $Q_{\text{beker}} = C_{\text{beker}} \cdot \Delta T = 150 \cdot (75 - 15) = 9,0 \cdot 10^3 \text{ J}$
- $E = 5,016 \cdot 10^4 + 9,0 \cdot 10^3 = 5,916 \cdot 10^4 \text{ J}$

Bereken hoe lang de magnetron aan moet staan.

- $E = 5,916 \cdot 10^4 \text{ J} \quad | \quad P = 800 \text{ W} \quad | \quad t = \dots \text{ s}$
- $E = P \cdot t \rightarrow 5,916 \cdot 10^4 = 800 \cdot t \rightarrow t = 74 \text{ s}$

VOORBEELD hoeveelheid warm water in een bad

Een bad is gevuld met 100 liter water van 12 °C. Een boiler levert water met een temperatuur van 75 °C. De warmtecapaciteit van de badkuip is $5,0 \cdot 10^3 \text{ J K}^{-1}$. De soortelijke warmte van water is $4,18 \cdot 10^3 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$. De dichtheid van water is $1,0 \cdot 10^3 \text{ kg m}^{-3}$. Er wordt geen warmte aan de omgeving afgestaan.

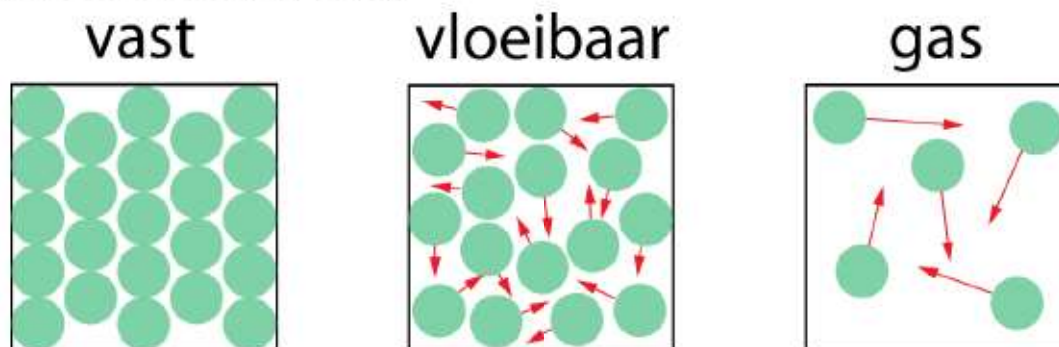
Bereken hoeveel liter warm water er aan het bad moet worden toegevoegd om het water een temperatuur van 34 °C te geven.

- 1 liter = $1,0 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \rightarrow 100 \text{ liter} = 1,0 \cdot 10^{-1} \text{ m}^3$
- 100 liter koud water is 100 kg
- $Q_{\text{koud water}} = c \cdot m \cdot \Delta T = 4,18 \cdot 10^3 \cdot 100 \cdot (34 - 12) = 9,196 \cdot 10^6 \text{ J}$
- $Q_{\text{bad}} = C_{\text{bad}} \cdot \Delta T = 5,0 \cdot 10^3 \cdot (34 - 12) = 1,1 \cdot 10^5 \text{ J}$
- $Q_{\text{koud water}} + Q_{\text{bad}} = 9,196 \cdot 10^6 + 1,1 \cdot 10^5 = 9,306 \cdot 10^6 \text{ J}$
- $Q_{\text{heet water}} = Q_{\text{koud water}} + Q_{\text{bad}}$ (wet van behoud van energie)
- $Q_{\text{heet water}} = 9,306 \cdot 10^6 = c \cdot m \cdot \Delta T = 4,18 \cdot 10^3 \cdot m \cdot (75 - 34)$
- $m = 54,3 \text{ kg} \rightarrow$ volume warm water is 54,3 liter

Faseovergang

Tot nu toe hebben we geen rekening gehouden met faseovergangen. Als warmte wordt toegevoegd tijdens het smelten of koken blijft de temperatuur constant. De opgenomen warmte wordt dan uitsluitend gebruikt om de gemiddelde afstand tussen de atomen te vergroten. De gemiddelde kinetische energie van de atomen, en daarmee de temperatuur, verandert tijdens een faseovergang niet.

In bijvoorbeeld vast zilver (symbool Ag) zijn de atomen zo dicht mogelijk op elkaar gestapeld. Als warmte wordt toegevoegd zet het rooster uit en gaan de Ag-atomen harder trillen. De toegevoegde warmte wordt gebruikt om de gemiddelde afstand tussen de atomen te vergroten (het rooster zet uit) én om de gemiddelde snelheid van de atomen te vergroten (de temperatuur neemt toe). Bij 1235 K gaat zilver smelten. In vloeibaar zilver is de gemiddelde afstand tussen de Ag-atomen groter dan in vast zilver. Bij het smeltpunt trillen de atomen zo hard en zijn de bindingen zo zwak dat de stof vloeibaar wordt.



Figuur 14 Warmte wordt opgenomen waardoor de stof uitzet en de atomen harder gaan trillen.

Om een stof te laten smelten of verdampen is energie nodig.

De smeltwarmte is de energie die nodig is om één kg vaste stof te smelten.

De verdampingswarmte is de energie die nodig is om één kg vloeistof te verdampen.

VOORBEELD zilver

Een zilveren staaf van 2,0 m lengte en een massa van 5,0 kg wordt verwarmd van $T = 293 \text{ K}$ totdat hij is gesmolten bij 1235 K .

- zilver heeft een soortelijke warmte van $0,386 \cdot 10^3 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$
- zilver heeft een smeltwarmte van $1,05 \cdot 10^5 \text{ J kg}^{-1}$

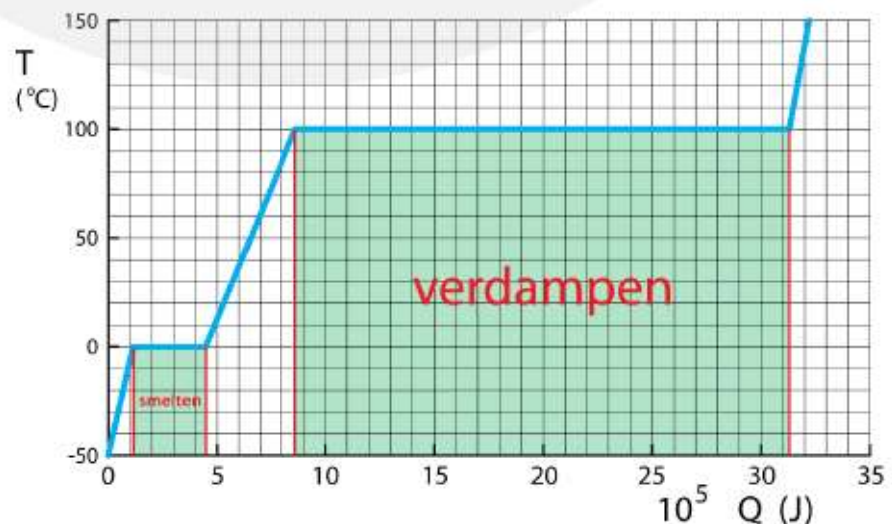
Bereken hoeveel energie er nodig is om de staaf te verwarmen.

- de temperatuur stijgt van 293 tot 1235 K
- $Q = c \cdot m \cdot \Delta T$
- opzoeken: $c = 0,386 \cdot 10^3 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$
- $Q = 0,386 \cdot 10^3 \cdot 5,0 \cdot (1235 - 293) \rightarrow Q = 1,818 \cdot 10^6 = 1,8 \cdot 10^6 \text{ J}$

Bereken hoeveel energie er nodig is om de staaf te smelten.

- opzoeken: smeltwarmte zilver is $1,05 \cdot 10^5 \text{ J/kg}$
- $Q = 1,05 \cdot 10^5 \cdot 5,0 = 5,25 \cdot 10^5 \text{ J}$

Bekende faseovergangen zijn het smelten en koken van water. In figuur 15 zie je hoeveel energie je moet toevoegen om de temperatuur van 1 kg water van -50 °C tot $+150 \text{ °C}$ te brengen. In het traject zijn twee faseovergangen, smelten bij 0 °C en koken bij 100 °C . Bij de overgang van ijs naar vloeibaar water worden de chemische bindingen zwakker maar dit kost niet zoveel energie. Bij de overgang van vloeibaar water naar waterdamp (gas) worden de bindingen volledig gebroken, hetgeen veel energie kost.



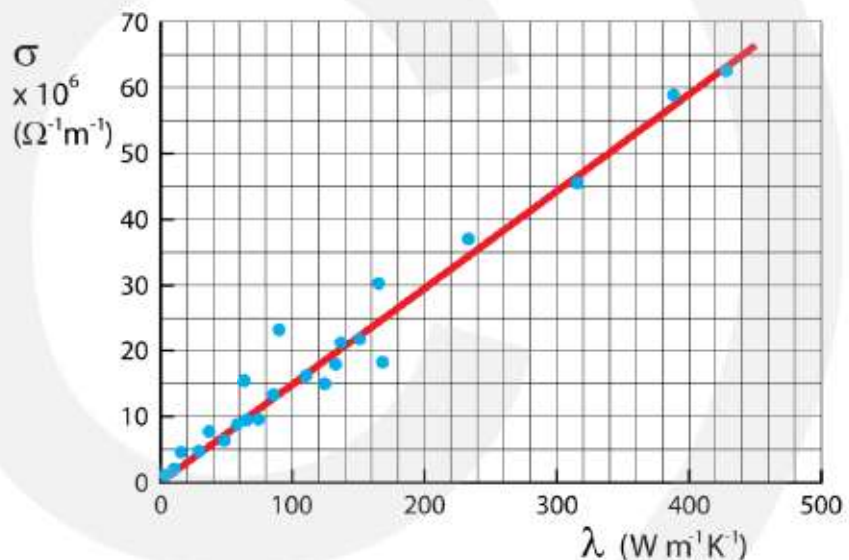
Figuur 15
Water (1 kg) wordt van -50 °C tot $+150 \text{ °C}$ verwarmd.

5.4 Warmte en elektrische geleiding

Warmtegeleiding en elektrische geleiding van metalen

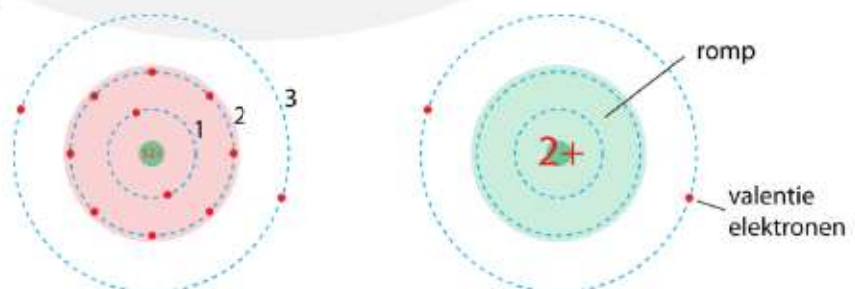
Het is opvallend dat alle metalen zowel warmte als elektriciteit goed geleiden. Zo is de warmtegeleidingscoëfficiënt van de meeste **metalen** tussen $30 - 300 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ terwijl **niet-metalen** een warmtegeleidingscoëfficiënt van $0,1 - 1 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ hebben. Bij de soortelijke weerstand is het verschil nog veel groter. Metalen hebben een soortelijke weerstand van $10^{-8} - 10^{-6} \Omega \text{ m}$ en niet-metalen een soortelijke weerstand meer dan $10^{10} \Omega \text{ m}$.

De **soortelijke geleidbaarheid** σ is het omgekeerde van de **soortelijke weerstand** $\rho \rightarrow \sigma = 1/\rho$. Zetten we bij metalen σ uit tegen de **warmtegeleidingscoëfficiënt** λ dan vind je een recht-evenredig verband. Zie figuur 16.



Figuur 16
Soortelijke geleidbaarheid σ uitgezet tegen de warmtegeleidingscoëfficiënt λ van metalen.

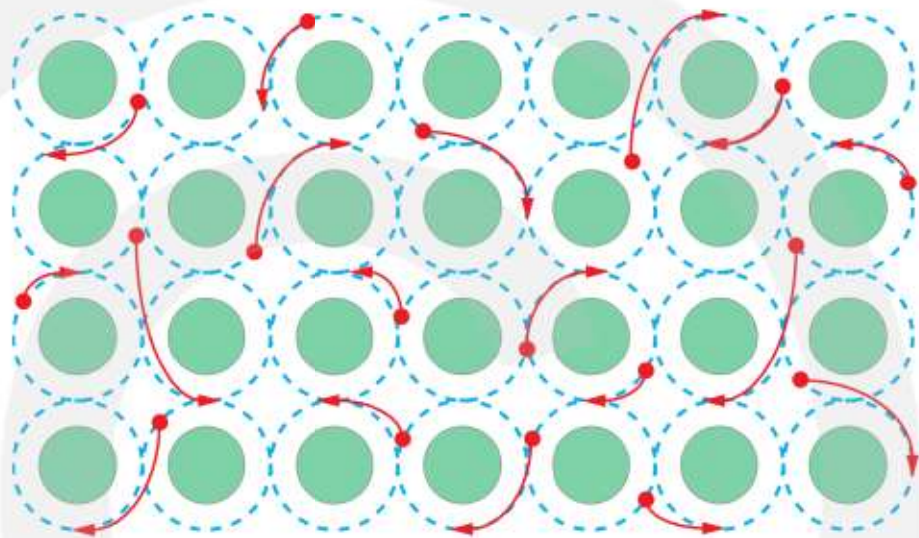
Uit figuur 16 blijkt dat voor metalen de warmtegeleiding en elektrische geleiding met elkaar samenhangen. In metalen kunnen elektronen gemakkelijk van atoom naar atoom springen. Dit komt omdat de elektronen in de buitenste schil, de valentie elektronen, zwak zijn gebonden. Om dit te begrijpen nemen we als voorbeeld het magnesium atoom, zie figuur 17.



Figuur 17
Het magnesium atoom.

Bij het magnesiumatoom kost het veel energie om een elektron uit de eerste en tweede schil te verwijderen. Om een elektron uit de derde schil te verwijderen kost veel minder energie. De atoomkern plus de elektronen in de schillen 1 en 2 noemen we de **romp** van het atoom.

Om de romp bevinden zich twee elektronen in de derde schil. Deze elektronen noemen we de **valentie-elektronen**. Omdat de valentie-elektronen zwak zijn gebonden aan de kern kunnen ze vrij gemakkelijk loskomen. Dit gebeurt in een metaal. In een metaal zijn de metaalatomen zo dicht bij elkaar dat een valentie-elektron kan overspringen van het ene naar het andere atoom. De valentie-elektronen bewegen hierdoor kriskras door het metaal. Zie figuur 18. De grote beweeglijkheid van de elektronen maakt dat alle metalen goede warmtegeleiders én goede elektrische geleiders zijn.



Figuur 18
Magnesium metaal
met vrije elektronen.

5.5 Spanning en rek

Spanning

Als je kracht uitoefent op een voorwerp kan het langer of korter worden, doorbuigen of breken. Verschillende materialen reageren anders op een kracht. Metaal kan relatief gemakkelijk worden verbogen, terwijl keramisch materiaal, zoals steen, niet buigt maar breekt.

Vervorming kan elastisch zijn of plastisch. Bij een **elastische vervorming** krijgt het voorwerp zijn oorspronkelijke vorm terug nadat de kracht is verdwenen. Bij een **plastische vervorming** behoudt het voorwerp zijn vorm als de kracht is verdwenen.

De **spanning** is de kracht die per vierkante meter wordt uitgeoefend. Spanning heeft als symbool σ (sigma) en heeft als eenheid pascal (Pa), wat gelijk is aan newton per vierkante meter (N/m^2).

Spanning is de kracht per vierkante meter:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

- σ is de spanning in pascal (Pa) (gelijk aan newton per vierkante meter, N/m^2)
- F is de kracht in newton (N)
- A is de oppervlakte van de doorsnede in vierkante meter (m^2)

Eén pascal (Pa) is gelijk aan één newton per vierkante meter (N/m^2).

Rek

De hoeveelheid uitrekking per meter is de **rek**. Rek heeft als symbool ε (epsilon) en is een getal zonder eenheid dat de verandering van de lengte per meter aangeeft. Vaak wordt de rek in procenten opgegeven.

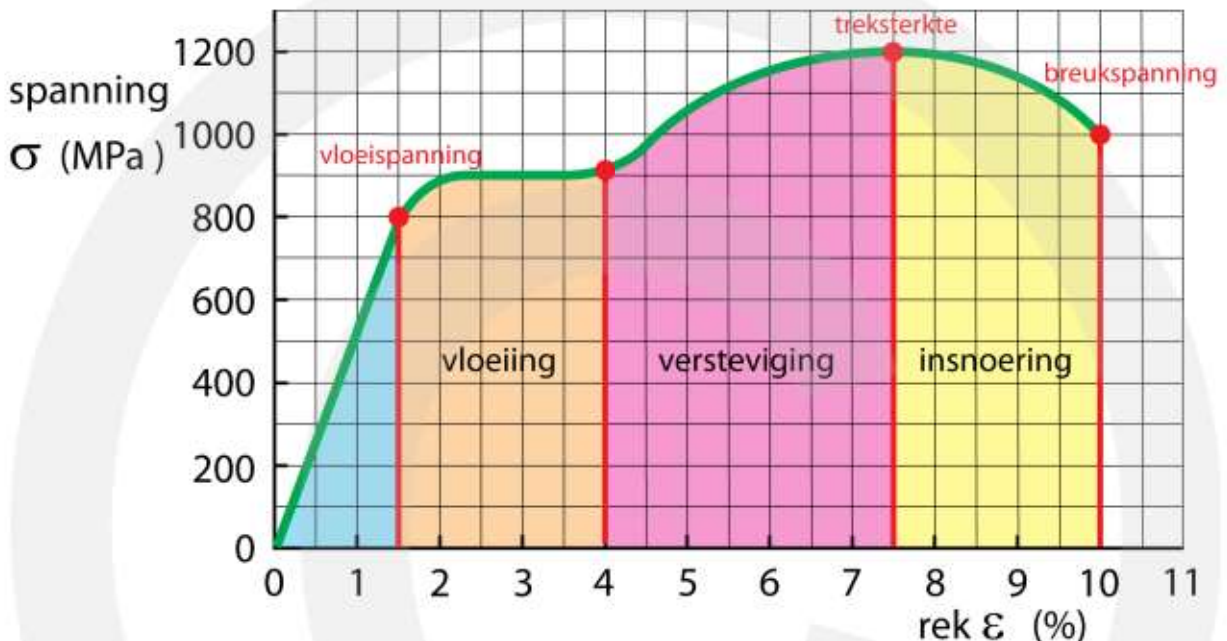
Rek is de verandering van de lengte per meter:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$$

- ε is de rek (geen eenheid, vaak in %) (Griekse letter epsilon)
- Δl is de verandering van de lengte (de uitrekking): $\Delta l = l - l_0$
- l_0 is de oorspronkelijke lengte

Het (spanning, rek)-diagram

Met een trekproef kun je de sterkte van een materiaal bepalen. Je neemt een staaf van dit materiaal en oefent hierop een steeds grotere kracht uit. Bij iedere kracht meet je de uitrekking Δl van de staaf. In figuur 19 zie je een voorbeeld van een (spanning, rek)-diagram van metaaldraad. Er zijn verschillende gebieden te onderscheiden.



Figuur 19 Een (spanning, rek)-diagram.

– gebied 1 (blauw) –

In dit gebied is de vervorming **elastisch**. Er is een recht evenredig verband tussen de spanning en de rek.

– gebied 2 (oranje) –

In dit gebied is de vervorming **plastisch**. Hoewel de rek toeneemt is er nauwelijks toename van de spanning. Dit verschijnsel heet **vloeien**, omdat het lijkt alsof de vaste stof als een vloeistof stroomt. De spanning waarbij het blauwe elastische gebied overgaat in het oranje plastische gebied heet de **vloeispanning**.

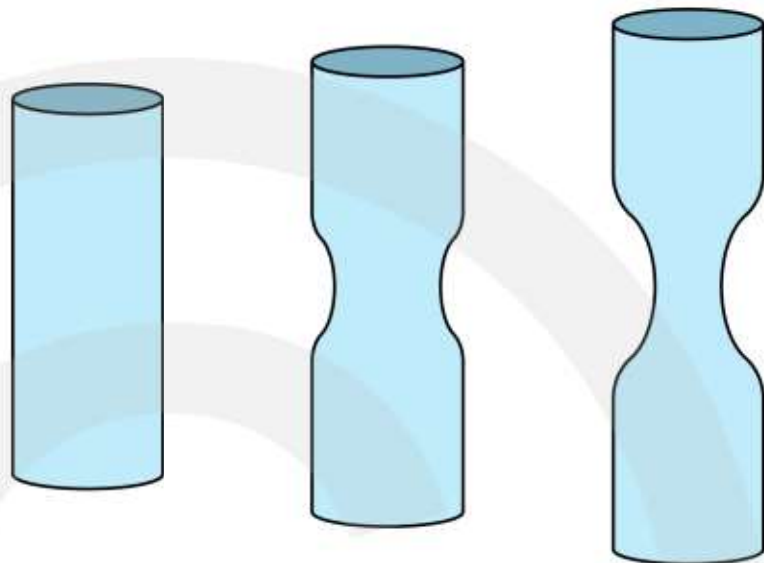
– gebied 3 (paars) –

In dit gebied is de vervorming **plastisch**. Om de rek te laten toenemen is meer spanning nodig. Het materiaal is steviger dan in het gebied met vloeïng. Bij de maximale spanning gaat gebied 3 over in gebied 4. De maximale spanning heet de **treksterkte**. Deze naam is misleidend omdat het om de **trekspanning** gaat. De rek mag niet groter zijn dan de waarde waarbij de spanning maximaal is. Gebeurt dit toch dan kom je in gebied 4 (geel) en breekt de draad.

– gebied 4 (geel) –

In dit gebied is de vervorming is **plastisch**. Er treedt **insnoering** op. Op één plaats wordt de staaf dunner. Hierdoor kan er met minder spanning meer rek worden verkregen. Op de plaats van insnoering gaat de staaf breken. Zie figuur 20.

De spanning waarbij de rek maximaal is en de draad breekt is de breukspanning. In figuur 19 breekt de draad als de rek groter is dan 10%. Dit is aangegeven met een rode stip.



Figuur 20
Insnoering treedt op als de spanning groter is dan de treksterkte. Op de plaats van de insnoering breekt de draad.

Elasticiteitsmodulus

In Gebied 1 (blauw) is er een recht evenredig verband tussen de spanning en de rek. De evenredigheidsconstante heet de **elasticiteitsmodulus** en wordt aangegeven met symbool E . De eenheid hiervan is pascal (Pa).

De elasticiteitsmodulus is de spanning gedeeld door de rek:
$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

- E is de elasticiteitsmodulus in pascal (Pa)
- σ is de spanning in pascal (Pa) ($1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$)
- ε is de rek (geen eenheid, vaak in %)

De elasticiteitsmodulus is een materiaaleigenschap die je kunt opzoeken in Binas. Net als de veerconstante van een spiraalveer geeft de elasticiteitsmodulus aan hoeveel kracht er nodig is om een bepaalde vervorming te krijgen. De elasticiteitsmodulus is een materiaaleigenschap en de veerconstante is de eigenschap van een voorwerp.

De elasticiteitsmodulus is de eigenschap van een materiaal.

De veerconstante is de eigenschap van een voorwerp.