

5 Stoffen en Materialen

vwo

5.0 Inleiding

Stenen

Het gebruik van stenen als werktuig is zo oud als de mensheid. Ook sommige dieren gebruiken stenen gebruiksvoorwerpen. De vroegste steentijd begint 2,5 miljoen jaar geleden, als de eerste mensen stenen vuistbijlen maken door splinters van een steen af te slaan waardoor een scherpe rand ontstaat. Lange tijd zijn hout, stenen, botten en huid de enige materialen die de mensheid gebruikt om te overleven. Het stenen tijdperk eindigt rond 6000 v. Chr. door de ontdekking van koper.



Stenen vuistbijl

Koper en brons

Naast goud is koper is een van de weinige metalen die in metallische vorm op aarde voorkomt. Goud is erg zacht en kan alleen gebruikt worden als sieraad. Koper is ook zacht, maar door het te verhitten in vuur en daarna snel af te koelen krijgt het de hardheid die nodig is om te worden gebruikt als werktuig. Bijlen en speerpunten gemaakt van koper, zijn scherper dan die van steen. Metallisch koper is zeldzaam. Koper is wel veel aanwezig in mineralen, maar om daaruit koper vrij te maken is niet eenvoudig. Het koper moet eerst worden gereduceerd van Cu^+ of Cu^{2+} naar Cu metaal en daarvoor is een reductor nodig. Kopermineraal moet in een afgesloten ruimte tot meer dan 1000°C worden verhit in aanwezigheid van koolstof of koolmonoxide. Ondanks de moeite die het kost wordt koper op vrij grote schaal gemaakt. Vanaf ongeveer 3000 v. Chr. wordt ook brons gebruikt als werktuig. Brons is een legering van koper en tin met een tingealte tussen 10% en 30%.



Bronzen bijl

Door de aanwezigheid van tin is brons harder en minder buigzaam dan koper en daardoor meer geschikt. Brons heeft een lager smeltpunt dan koper. Gegoten brons wordt nog steeds gebruikt voor kerkklokken, voor standbeelden en in bronzen medailles.

IJzer

De bronstijd wordt opgevolgd door de ijzertijd. Het eerste ijzer dat wordt gebruikt is afkomstig van meteorieten, maar die worden niet vaak gevonden. Om ijzer uit ijzererts vrij te maken kost meer moeite dan het maken van koper of brons want de temperatuur moet een stuk hoger zijn. Vanaf ongeveer 1200 v. Chr. lukt het om ijzer te maken en begint de



Ijzeren zwaard

ijzertijd in het Midden-Oosten. De grondstof voor ijzer komt op veel plaatsen voor en als je 1% koolstof toevoegt aan ijzer krijg je staal wat harder en lichter is dan brons en daardoor heel geschikt voor dolken, zwaarden en ander wapentuig. IJzer en staal worden op steeds grotere schaal geproduceerd en rond 800 v. Chr. is ijzer overal aanwezig. Sindsdien is dit niet meer veranderd, want ook nu nog worden de meeste werktuigen van ijzer gemaakt.

Keramiek

Niet alleen metaal wordt gebruikt, ook keramiek kent een lange geschiedenis. Ongeveer 30.000 jaar v. Chr. ontdekken mensen dat je harde keramische producten kunt maken door klei en water te mengen en het daarna te verhitten. In het begin worden beeldjes gemaakt met een religieus of artistiek doel. Vanaf 20.000 jaar v. Chr. worden in Oost-Azië keramische potten gemaakt om voedsel in te bewaren. Het gebruik van aardewerk neemt rond 9000 v. Chr. toe als mensen zich gaan vestigen als boer. Behalve voor opslag van water en voedsel wordt aardewerk ook gebruikt als bouw materiaal. Klei wordt gedroogd in de zon of gebakken in vuur. Vanaf 4000 v. Chr. lukt het om de temperatuur te verhogen tot 1600 °C wat nodig is om uit zand glas te maken.

Venus van Dolní Věstonice
29000 jaar v. Chr.

Aardewerk pot uit de
oudheid

Glas uit de Romeinse tijd



Cement en beton

Klei en zand kun je ook gebruiken om cement en beton te maken. De eerste cementen vloer komt uit 7000 v. Chr. Om cement te maken moet je kalksteen (CaCO_3) of gips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) mengen met klei en water en verhitten tot 1500 °C. Hierbij worden nieuwe chemische bindingen gemaakt, wat een hard materiaal oplevert. Als je grind toevoegt aan cement krijg je beton wat nog een stuk harder is.

Voor de Romeinen hebben veel beton gebruikt in de bouw. Doordat ze vulkanische as toevoegde is het Romeinse beton beter bestand tegen zout water dan het huidige beton. Bouwwerken gemaakt van beton gaan tegenwoordig ongeveer 100 jaar mee, maar het Pantheon is gemaakt van Romeins beton en is na bijna 2000 jaar nog steeds in heel goede staat. Zelfs Romeins betonnen onderwaterconstructies hebben 2000 jaar zout water en golfslag overleefd.



Pantheon (125 n. Chr.)

Organische materialen

Na de Romeinse tijd is er lange tijd nauwelijks vooruitgang bij het ontwikkelen van nieuwe materialen. Er wordt van alles geprobeerd, maar omdat scheikundige kennis ontbreekt is er weinig succes. Dit verandert in het begin van de 19^e eeuw door de herontdekking van het atoom als kleinste bouwsteen. In 1803 presenteert **John Dalton** (1766–1844) zijn atoomtheorie, waarmee hij teruggrijpt op het idee van **Democritus** (460 –356 v. Chr.) dat

materie uit atomen bestaat. Dalton realiseert zich dat er verschillende soorten atomen zijn (de elementen) die je met elkaar kunt combineren tot moleculen waarmee je nieuwe stoffen kunt maken. In 1816 onderzoekt **Michel Chevreul** (1786–1889) dierlijke vetten en maakt daaruit zeep. Dit is de start van de organische chemie. In die tijd denkt men dat stoffen uit levende organismen "levenskracht" hebben in tegenstelling tot anorganische stoffen. Daar komt verandering in als het lukt om ureum $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ te maken door kaliumcyanaat KOCN te laten reageren met ammoniumsulfaat $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$. Ureum is een bestanddeel van urine en zou dus levenskracht moeten hebben, maar blijktbaar kan het gemaakt worden uit anorganische stoffen.

Voor de blauwe kleurstof indigo, bekend van jeansbroeken, geldt hetzelfde. Al 6000 jaar wordt indigo gewonnen uit bladeren van planten en gebruikt als kleurstof voor kleding en in 1878 lukt het om indigo te maken met een chemisch proces. Ook geneesmiddelen kunnen chemisch worden gemaakt. Vanaf 2000 jaar v. Chr. worden wilgenbladeren gebruikt als pijnstiller en in 1897 wordt de werkzame stof acetylsalicylzuur (aspirine) gesynthetiseerd.



Indigo kleurstof

Halfgeleiders

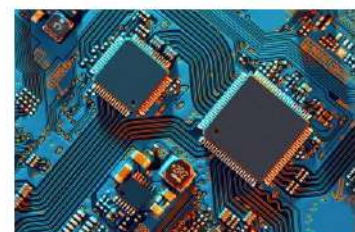
Tenslotte wil ik stilstaan bij de ontwikkeling van halfgeleiders. Dit zijn stoffen die elektrische stroom minder goed geleiden als metalen, maar beter gaan geleiden als de temperatuur toeneemt of als er licht op schijnt. In 1947 komt de grote doorbraak met de uitvinding van de transistor. Eerst wordt germanium gebruikt als halfgeleider maar in 1954 wordt dit vervangen door silicium. Vanaf dat moment gaat het snel. Transistors komen in radio's en in televisies en worden steeds kleiner. In 1958 wordt de eerste geïntegreerde schakelingen (IC's) gemaakt door transistors aan elkaar te koppelen. In 1962 worden 16 transistors samengebracht op een plakje silicium (een chip) en in 1970 lukt het om 10.000 transistors op een chip te maken. Vanaf dat moment verdubbelt iedere twee jaar het aantal transistors op een chip. Op dit moment zitten er 15 miljard transistors op de chip in je laptop en in je telefoon.

Om deze chips te maken moet het silicium een extreem hoge zuiverheid van minimaal 99,999999999% hebben. Eerst wordt een dikke staaf siliciumkristal uit gesmolten silicium gegroeid. Daaruit worden dunne schijven (wafers) gezaagd. Op deze schijven worden de transistors aangebracht. Daarna worden de processoren uit de wafers gezaagd en voorzien van elektrische contacten. Als laatste worden de processoren in plastic gegoten. Het proces om van gesmolten silicium tot IC's te komen vergt heel veel stappen. Bij iedere stap mag er niets fout gaan want anders werkt de processor niet.

Silicium kristal met wafers

Transistors op een wafer

Processoren



5.0 Inhoud

5.1 Warmte en inwendige energie	6
– Warmte	6
– Kelvin als eenheid voor temperatuur	7
5.2 Vast, vloeibaar, gas en plasma	8
– De fasen van een stof	8
– Faseovergangen	8
– Dichtheid	9
– Drijven en zinken	10
– Water en ijs	11
5.3 Transport van warmte	12
– Verplaatsing van warmte	12
– Warmtegeleiding	12
– Warmtegeleiding door een wand	13
– Warmtestroming	14
– Warmtestraling	15
– Warmte-isolatie	15
– Warmtepompen	16
– Energiebalans van een warmtepomp	16
5.4 Warmte opnemen en warmte afstaan	18
– Verandering van inwendige energie	18
– Soortelijke warmte	18
– Warmtecapaciteit	20
– Faseovergang	21
5.5 Spanning en rek	23
– Spanning	23
– Rek	23
– Het (spanning, rek)-diagram	23
– Elasticiteitsmodulus	24
5.6 Functionele materialen	26
– Eigenschappen van stoffen	26
– Geheugenmetaal	27
– Piëzo-elektrische materialen	28
– Niet-newtonse vloeistoffen	29
– Magnetische vloeistoffen	30
– Polymeren	31
– Koolstof	32
– Aerogel	33

5.7 Samenvatting	34
– Grootheden en eenheden	34
– Weten	34
– Formules	36
– Figuren	36

5.1 Warmte en inwendige energie

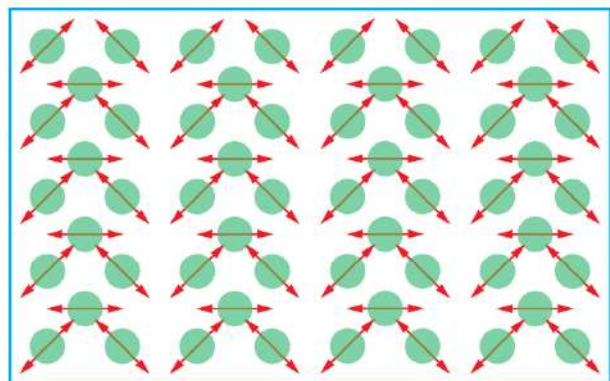
Warmte

In het hoofdstuk Energie is 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 en als een chemische stof wordt verbrand. Laten we eerst kijken hoe warmte ontstaat door arbeid van een wrijvingskracht. Als je koude handen hebt worden ze warm door ze tegen elkaar aan 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 **bindingsenergie** en ze hebben **kinetische energie**. En als je de bindingsenergie en de kinetische energie van alle atomen bij elkaar optelt krijg je de inwendige energie.

De inwendige energie van een voorwerp is de bindingsenergie 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 voorwerp verandert niet, maar de kinetische energie van de atomen waaruit het voorwerp bestaat verandert wel.



Figuur 1 Inwendige energie van een voorwerp.

Over de grootte van temperatuur hebben we nog geen goede afspraak gemaakt. Warmte en temperatuur hebben veel met elkaar te maken maar zijn niet hetzelfde. Meestal wordt de temperatuur hoger als een stof warmte opneemt, maar niet altijd. We moeten dus goed opletten om de begrippen warmte en temperatuur niet met elkaar te verwarren.

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

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. Later in dit hoofdstuk ga je hier meer over leren.

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

Kelvin als eenheid voor temperatuur

In Europa gebruiken we graden Celsius als eenheid van temperatuur en in de Verenigde Staten gebruiken ze de nog oudere eenheid graden Fahrenheit. Maar beide eenheden zijn niet handig. Beter is het om de **Kelvin** als eenheid van temperatuur te gebruiken, omdat er een recht evenredig verband is tussen de gemiddelde kinetische energie van de atomen en de temperatuur in kelvin. Een temperatuurverschil van één graad celsius is ook een temperatuurverschil van één kelvin. Het nulpunt van de kelvinschaal ligt op $-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Bij deze temperatuur hebben de atomen hun minimale kinetische energie. De temperatuur van $-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 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. Omrekenen van $^{\circ}\text{C}$ naar kelvin en omgekeerd gaat als volgt:

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

$$T_{\text{celsius}} = T_{\text{kelvin}} - 273,15 \quad | \quad T_{\text{kelvin}} = T_{\text{celsius}} + 273,15$$

5.2 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 kom je minder vaak tegen maar is aanwezig in TL-buizen, in spaarlampen en in vuur. In de vaste fase heeft een voorwerp een vast volume én een vaste vorm. In de vloeibare fase heeft een voorwerp een vast volume maar geen vaste vorm. In de gasfase heeft een voorwerp geen vast volume en ook geen vaste vorm.

– 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), waarbij ze om een vaste plaats trillen. Als er energie aan een vaste stof wordt toegevoegd wordt de afstand tussen de atomen groter en krijgen de atomen meer kinetische energie waardoor ze harder gaan trillen. Zie figuur 2.

– 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. Zie figuur 2.

– gas fase –

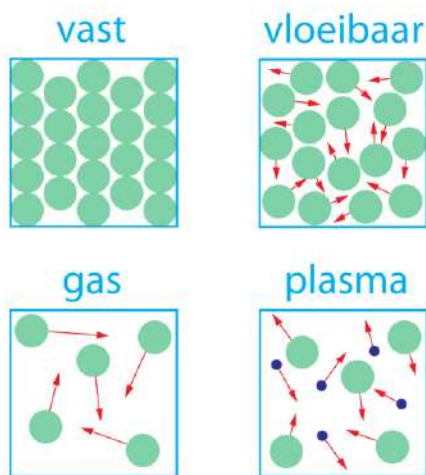
In de gas fase zijn de atomen of moleculen niet aan elkaar gebonden maar bewegen ze kriskras door de ruimte. In een gas is de afstand tussen de atomen veel groter dan in de vloeibare fase, waardoor de atomen vrijwel geen krachten op elkaar uitoefenen. Omdat de atomen in een gas elkaar niet aantrekken verspreidt een gas zich spontaan over de hele ruimte. Als er energie aan een gas wordt toegevoegd krijgen de atomen meer kinetische energie waardoor ze een grotere snelheid krijgen. Zie figuur 2.

– plasma fase –

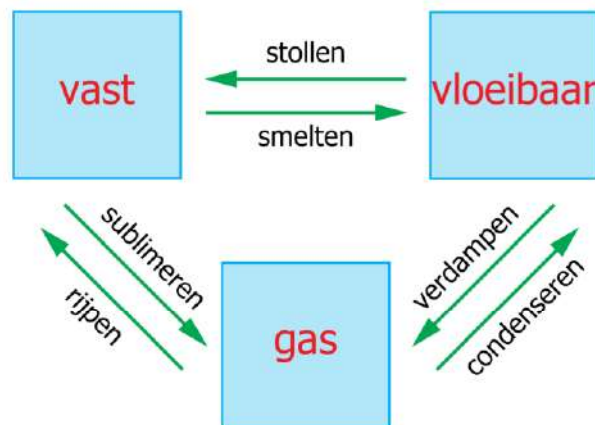
Ook bij de plasma fase bewegen de atomen kriskras door de ruimte. Het verschil met de gas fase is dat bij een plasma de atomen één of meer elektronen zijn kwijtgeraakt. In figuur 2 zijn de paarse stippen rondvliegende elektronen. Een plasma is een mengsel van een gas van ionen en een gas van elektronen. 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 3 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 2 De vier fasen van een stof.



Figuur 3 Namen van faseovergangen tussen de vaste-, de vloeibare- en de gasfase.

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 faseovergang 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, wordt de temperatuur weer hoger als je warmte toevoegt.

Dichtheid

Zoals je ziet in figuur 2 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 is, 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**. Soms mag je ook gram per kubieke centimeter **g/cm³** gebruiken.

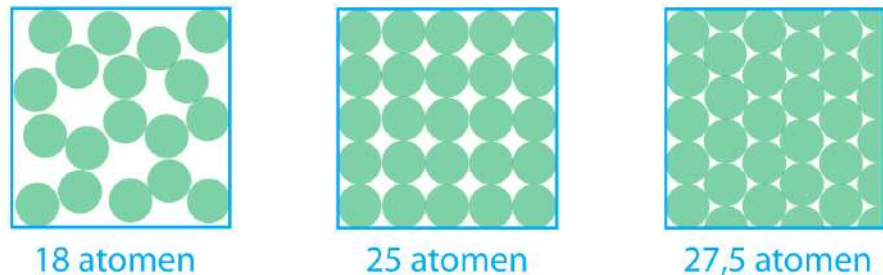
$$\rho = \frac{m}{V}$$

- 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.

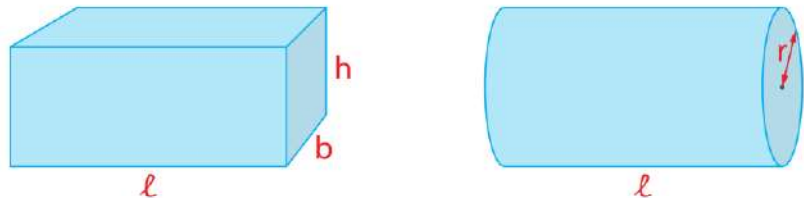
De dichtheid wordt bepaald door hoeveel ruimte er tussen de atomen zit én door de massa van één atoom. In figuur 4 zie je atomen in een plat vlak. Links zit er ruimte tussen de atomen, in het midden raken ze elkaar, en rechts is de stapeling zo compact mogelijk. De dichtheid wordt groter als er meer atomen in hetzelfde volume passen.

Figuur 4 Het stapelen van atomen in een plat vlak.



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 5. Gebruik je als eenheid van volume kubieke centimeter dan moet je alle lengtes (b , h , ℓ en r) in centimeter invullen.

Figuur 5 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 2,4 cm een lengte van 25 cm en weegt 3,56 kg.

Bereken de dichtheid van ijzer.

- $V = \pi r^2 \cdot \ell \rightarrow V = \pi \cdot (2,4 \cdot 10^{-2})^2 \cdot 0,25 = 4,52389 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$
- $\rho = \frac{m}{V} \rightarrow \rho = \frac{3,56}{4,52389 \cdot 10^{-4}} = 7,87 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$

Bereken de diameter van een ijzeren staaf met een lengte van 40 cm en een massa van 5,0 kg?

- $\rho = \frac{m}{V} \rightarrow 7,87 \cdot 10^3 = \frac{5}{V} \rightarrow V = 6,35324 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$
- $V = \pi r^2 \cdot \ell \rightarrow 6,35324 \cdot 10^{-4} = \pi \cdot r^2 \cdot 0,4$
- $r = 2,2485 \cdot 10^{-2} \text{ m} \rightarrow d = 2 \cdot r = 4,497 \cdot 10^{-2} = 4,5 \cdot 10^{-2} \text{ m}$

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.

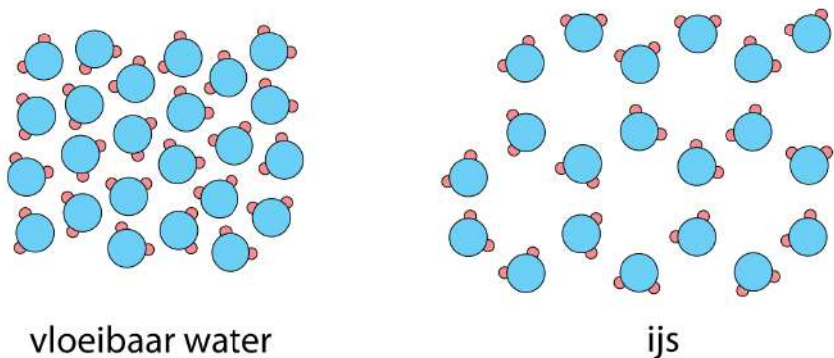
ρ_{stof}	kleiner dan	ρ_{water}	→	stof blijft drijven
ρ_{stof}	gelijk aan	ρ_{water}	→	stof gaat zweven
ρ_{stof}	groter dan	ρ_{water}	→	stof gaat zinken

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. De dichtheid van ijs is lager dan die van water omdat bij het bevriezen de watermoleculen zich in ringen met zes moleculen ordenen. Zie figuur 6. Hierdoor nemen ze meer ruimte in, waardoor water tijdens het bevriezen uitzet.

Figuur 6 Water zet uit als het bevroert.

$\rho_{\text{ijs}} < \rho_{\text{water}}$ zodat ijs op water drijft.



5.3 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 plaatsen met een hoge temperatuur naar plaatsen met een 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**.

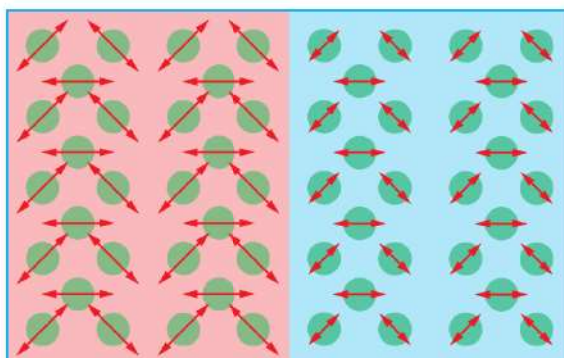
Warmte verplaatst zich spontaan van plaatsen met een hoge temperatuur naar plaatsen met een lage temperatuur.

Warmtegeleiding

Warmtegeleiding gebeurt als atomen met veel kinetische energie (hoge temperatuur) botsen tegen atomen met weinig kinetische energie (lage temperatuur). Stel dat een voorwerp aan de ene kant een hogere temperatuur heeft dan aan de andere kant. 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 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 7 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.



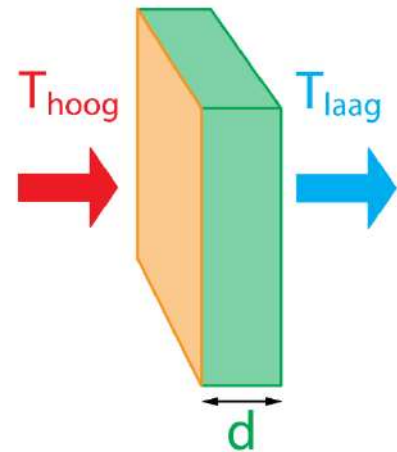
Figuur 7 Warmtegeleiding.

Warmtegeleiding door een wand

Door warmtegeleiding wordt warmte door een wand verplaatst van de kant met een hoge temperatuur naar de kant met een lage temperatuur. In figuur 8 is een ruimte met een hoge temperatuur door een wand gescheiden van een ruimte met een lage temperatuur. Atomen aan de kant met een hoge temperatuur botsen tegen de wand die daardoor ook een hoge temperatuur krijgt. Door de wand vindt warmtegeleiding plaats.

De hoeveelheid energie die per seconde door de wand gaat wordt bepaald door:

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



Figuur 8 Warmtegeleiding door een wand.

Dit geeft de volgende formule.

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

- P is de energie die per seconde door de wand gaat (J s^{-1}) of 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 K 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 raam heeft een dikte van 5,0 mm. Op een dag is het binnen 20°C en buiten $-5,0^{\circ}\text{C}$.

Hoeveel warmte gaat er per uur door een raam van 2,5 bij 1,6 meter?

- $\lambda = 0,90 \text{ W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ | $A = 2,5 \cdot 1,6 = 4,0 \text{ m}^2$ | $\Delta T = 25^{\circ}\text{C}$ | $d = 0,005 \text{ m}$
- $P = \lambda \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{d} \rightarrow P = 0,9 \cdot 4 \cdot \frac{25}{0,005} = 1,8 \cdot 10^4 \text{ W}$
- $E = P \cdot t \rightarrow E = 1,8 \cdot 10^4 \cdot 60 \cdot 60 = 6,48 \cdot 10^7 \text{ J}$

Hoeveel kubieke meter (Gronings) aardgas moet worden verbrand.

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

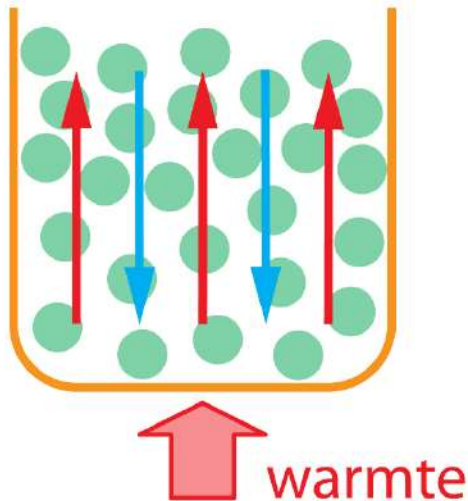
Warmtestroming

In een vloeistof of een gas kunnen moleculen over een grote afstand bewegen. Als moleculen met veel energie bewegen naar een plaats met lage temperatuur wordt er warmte verplaatst. Deze verplaatsing van warmte heet warmtestroming.

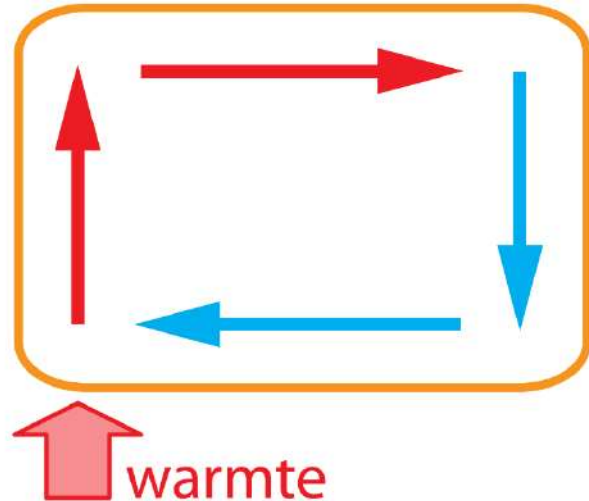
Warmtestroming gebeurt als moleculen met veel energie zich over een grote afstand verplaatsen.

In een vaste stof kunnen moleculen niet over een grote afstand verplaatsen en is warmtestroming niet mogelijk. Maar in een vloeistof of gas kan dit wel, bijvoorbeeld door **convectorie**. Laten we kijken naar convectorie 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 warme vloeistof zakt koude vloeistof naar beneden en als die aankomt bij de warmtebron wordt deze koude vloeistof verwarmd. Er ontstaat een circulerende vloeistofstroom, waardoor warmte wordt getransporteerd van onder naar boven. Zie figuur 9.

Als een vat maar aan één kant wordt verwarmd gaat de vloeistof in een kring stromen. Zie figuur 10. 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 9 Onderaan stroomt warmte naar binnen. Hierdoor zet de vloeistof onderin uit en gaat drijven op de koudere vloeistof.



Figuur 10 Vanwege convectorie gaat vloeistof of gas in een kring stromen.

Warmtestroming door convectorie kan alleen als er zwaartekracht is. Als warmtestroming door convectorie 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 je handen verbrandt.

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 11.

Het oppervlak van de zon heeft een temperatuur van 5500°C en zendt zichtbaar licht uit. Bij een hele hoge temperatuur wordt er zelfs gevaarlijke röntgenstraling uitgezonden, maar gelukkig is de temperatuur van de zon daarvoor niet hoog genoeg.



Figuur 11 Lava is roodgloeïend steen.

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) $\rightarrow$ rood (1000°C) $\rightarrow$ 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

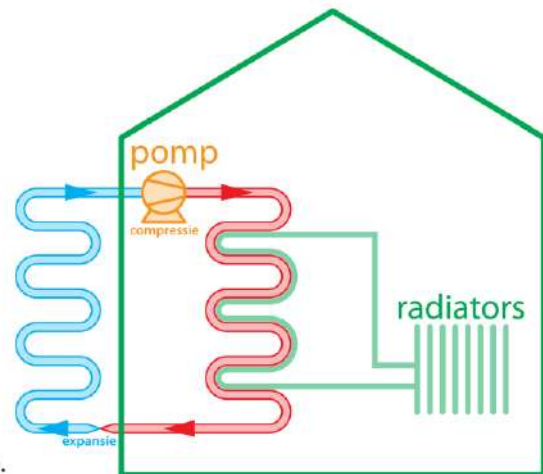
- een (aluminium) reflector aanbrengen, waardoor de uitgezonden warmtestraling wordt teruggekaatst

Warmtepompen

We hebben gezien dat warmte spontaan stroomt van plaatsen met een hoge temperatuur naar plaatsen met een lage temperatuur en dat dit op drie manieren kan. Maar soms wil je dat warmte de andere kant uit stroomt, van een lage naar een hoge temperatuur en dat gebeurt nooit spontaan. Je hebt hiervoor een **warmtepomp** nodig. Het bekendste voorbeeld van een warmtepomp is een **koelkast**. Je wil dat het binnen in de koelkast kouder is dan erbuiten en je moet dus warmte uit de koelkast pompen naar de omgeving. Warmte gaat hierbij van een plaats met een lage temperatuur (in de koelkast) naar een plaats met een hoge temperatuur (buiten de koelkast).

Je kunt een warmtepomp ook gebruiken om je huis te verwarmen. Je pompt dan warmte van de buitenlucht (lage temperatuur) naar binnen (hoge temperatuur). Een warmtepomp is gebaseerd op het rondpompen van een **koelmiddel** met een laag kookpunt, bijvoorbeeld methylpropan (C_4H_{10}) dat een kookpunt heeft van $-11,7^\circ\text{C}$ bij de standaarddruk p_0 (1,0 bar). Bij deze druk heeft het koelmiddel bij 20°C de gasfase, maar als we de druk groter maken wordt het kookpunt hoger en is het koelmiddel vloeibaar bij 20°C .

Van dit effect maken we gebruik in een warmtepomp, waarmee we ons huis kunnen verwarmen door warmte van buiten naar binnen te pompen. Buiten maken we de druk laag en is het koelmiddel, ondanks de lage temperatuur, gasvormig. Binnen maken we de druk hoog en is het koelmiddel, ondanks de hoge temperatuur, vloeibaar. In figuur 12 zie je de kringloop van het koelmiddel.



Figuur 12 Warmtepomp.

Het koelmiddel komt gasvormig in de warmtepomp die het **samenperst** waardoor het kookpunt toeneemt en het koelmiddel **condenseert**. Bij het samenpersen krijgt het koelmiddel een hoge temperatuur. In een **warmtewisselaar** gaat de warmte van het koelmiddel naar het water van de verwarming. Het afgekoelde koelmiddel gaat nu naar buiten waar het koud is. Daar later we de druk zakken waardoor het kookpunt laag wordt en het koelmiddel gaat **verdampen**. Bij deze lage druk gaat het gas **expanderen**, waarbij het een lage temperatuur krijgt. Omdat de temperatuur van het koelmiddel nu lager is dan die van de buitenlucht stroomt er warmte van de buitenlucht naar het koelmiddel. Het opgewarmde koelmiddel stroomt het huis in en komt weer terug in de warmtepomp. Omdat het koelmiddel warmte uit de buitenlucht opneemt en deze warmte binnen afgeeft spreken we van een warmtepomp.

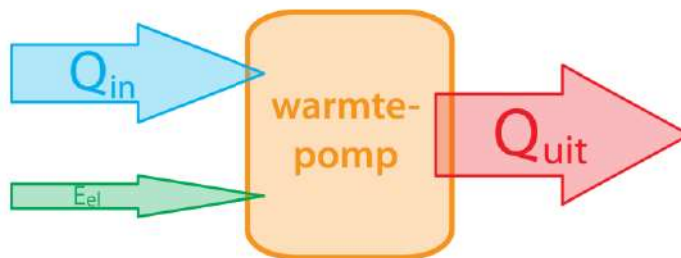
Energiebalans van een warmtepomp

Om een warmtepomp te laten werken moet je het koelmiddel samenpersen en rondpompen en dit kost energie. Net als in een fietspomp moet je bij het samenpersen van gas kracht zetten om een zuiger in te duwen en daarbij verricht je **arbeid** op het gas. Arbeid is

kracht keer afstand, $W = F \cdot s$, en als je veel kracht moet zetten en daarmee iets over een grote afstand verplaatst verricht je veel arbeid. Deze arbeid wordt opgeslagen als inwendige energie van het gas, waardoor de temperatuur van het gas stijgt.

Het samenpersen gebeurt met een elektrische pomp en deze pomp verricht dus arbeid op het gas. Een warmtepomp neemt elektrische energie op en staat warmte af aan de verwarming. Maar dat is niet het hele verhaal, want een warmtepomp neemt ook warmte op van de buitenlucht. In figuur 13 zie je de aanvoer en afvoer van energie in een warmtepomp. De wet van behoud van energie zegt dat de aangevoerde energie E_{in} gelijk moet zijn aan de afgevoerde energie E_{uit} . Voor een warmtepomp geldt: $E_{in} = E_{uit} \rightarrow E_{el} + Q_{in} = Q_{uit}$.

Figuur 13 Energiebalans van een warmtepomp.



Een warmtepomp produceert veel meer warmte Q_{uit} dan de opgenomen elektrische energie E_{el} . De verhouding Q_{uit} / E_{el} heet de COP-waarde (coefficient of performance) en ligt voor een warmtepomp tussen 4 en 5. Een gewone elektrische kachel neemt geen warmte op uit de buitenlucht, zodat Q_{uit} nooit meer kan zijn dan E_{el} . De COP-waarde van een gewone kachel is dus maximaal 1.

Nadeel van een warmtepomp is dat het met een lagere temperatuur werkt. Het verwarmingswater wordt hooguit 50 °C terwijl dat bij een gewone cv-installatie 60 tot 80 °C is. Om het huis toch snel warm te krijgen heb je grotere radiatoren nodig of vloerverwarming.

5.4 Warmte opnemen en warmte afstaan

Verandering van inwendige energie

De inwendige energie van een voorwerp kan toenemen doordat een wrijvingskracht arbeid uitoefent of doordat het voorwerp rechtstreeks 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 rechtstreeks opnemen en afstaan van warmte.

Soortelijke warmte

We zoeken een formule waarmee we kunnen uitrekenen hoeveel warmte 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 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 ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$) of ($\text{J kg}^{-1} \text{°C}^{-1}$)
- m is de massa in kilogram (kg)
- ΔT is de verandering van de temperatuur in graden celsius (°C) of in kelvin (K)

In de formule staat de **soortelijke warmte c** . Dit is voor iedere stof anders en geeft aan hoeveel warmte 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 wordt afgestaan door een ander voorwerp. De wet van behoud van energie geeft aan dat de warmte die het voorwerp met hoge temperatuur afstaat altijd 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 $Q = c \cdot m \cdot \Delta T$ kunnen we 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 $12\text{ }^{\circ}\text{C}$ gebracht. Het water warmt hierdoor op tot $20\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Hoeveel kilogram weegt het hoefijzer?

- $\Delta T_{\text{water}} = 20 - 12 = 8\text{ }^{\circ}\text{C}$ | $\Delta T_{\text{hoefijzer}} = 1200 - 20 = 1180\text{ }^{\circ}\text{C}$
- $Q_{\text{water}} = c_{\text{water}} \cdot m \cdot \Delta T = 4,18 \cdot 10^3 \cdot 5 \cdot 8 = 1,672 \cdot 10^5\text{ J}$
- $Q_{\text{hoefijzer}} = Q_{\text{water}}$ **wet van behoud van energie**
- $Q_{\text{hoefijzer}} = c_{\text{ijzer}} \cdot m \cdot \Delta T \rightarrow 0,46 \cdot 10^3 \cdot m \cdot 1180 = 1,672 \cdot 10^5 \rightarrow m = 0,31\text{ kg}$

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?

- $\Delta T_{\text{koud water}} = 34 - 12 = 22\text{ }^{\circ}\text{C}$ | $\Delta T_{\text{warm water}} = 80 - 34 = 46\text{ }^{\circ}\text{C}$
- $Q_{\text{koud water}} = c \cdot m \cdot \Delta T = 4,18 \cdot 10^3 \cdot 100 \cdot 22 = 9,196 \cdot 10^6\text{ J}$
- $Q_{\text{warm water}} = Q_{\text{koud water}}$ **wet van behoud van energie**
- $Q_{\text{heet water}} = 9,196 \cdot 10^6 = 4,18 \cdot 10^3 \cdot m \cdot 46 \rightarrow m = 47,826 = 48\text{ kg}$

Behalve door twee voorwerpen met elkaar in contact te brengen kan je ook op een andere manier de inwendige energie van een voorwerp veranderen. Je kunt 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?

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

Hoelang moet de magnetron aanstaan?

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

Warmtecapaciteit

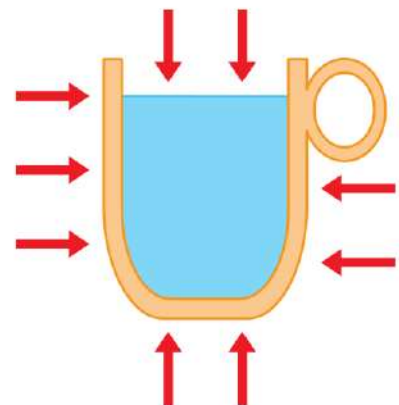
Als water in een beker wordt verwarmd stijgt niet alleen de temperatuur van het water maar ook die van de beker. Een deel van de toegevoegde warmte gaat naar de beker. Omdat de beker uit verschillende materialen bestaat gebruiken we een nieuwe grootheid: de **warmtecapaciteit**. Dit is de hoeveelheid warmte die nodig is om de temperatuur van het voorwerp één graad te laten stijgen. Omdat de warmtecapaciteit voor ieder voorwerp anders is kan je het niet opgezocht in Binas.

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

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

- Q is de warmte die is opgenomen of is afgestaan (J)
- C is de warmtecapaciteit (J K^{-1}) of ($\text{J }^\circ\text{C}^{-1}$) **hoofdletter C**
- ΔT is de verandering van de temperatuur in graden celsius ($^\circ\text{C}$) of in kelvin (K)

In figuur 14 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 14 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
- $Q_{\text{water}} = c \cdot m \cdot \Delta T = 4,18 \cdot 10^3 \cdot 0,200 \cdot (75 - 15) = 5,016 \cdot 10^4 \text{ J}$
- $Q_{\text{beker}} = C_{\text{beker}} \cdot \Delta T = 150 \cdot (75 - 15) = 9,0 \cdot 10^3 \text{ J}$
- $E = 5,016 \cdot 10^4 + 9,0 \cdot 10^3 = 5,916 \cdot 10^4 = 5,92 \cdot 10^4 \text{ J}$

Bereken hoelang de magnetron aan moet staan.

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

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 · 10³ J K⁻¹. Neem voor de dichtheid van water 1,0 · 10³ kg m⁻³. Er gaat geen warmte naar de omgeving.

Bereken hoeveel liter warm water je aan het bad moet toevoegen om het water een temperatuur van 34 °C te geven.

- 1 liter = 1,0 · 10⁻³ m³ → 100 liter = 1,0 · 10⁻¹ m³ → 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
- $Q_{\text{heet water}} = 9,306 \cdot 10^6 = c \cdot m \cdot \Delta T = 4,18 \cdot 10^3 \cdot m \cdot (75 - 34)$
- $m = 54,3 \text{ kg} \rightarrow \text{volume warm water is 54 liter}$

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 afstand tussen de atomen te vergroten. De gemiddelde kinetische energie van de atomen, en daarmee de temperatuur, verandert tijdens een faseovergang niet. De warmte die nodig is om één kg stof te laten smelten is de **smeltwarmte** en de warmte die nodig is om één kg stof te laten verdampen is de **verdampingswarmte**. De smeltwarmte en de verdampingswarmte zijn stoffeigenschappen die je in Binas kunt opzoeken.

VOORBEELD zilver

Een zilveren staaf met een massa van 5,0 kg wordt verwarmd van $T = 293 \text{ K}$ totdat het is gesmolten bij 1235 K .

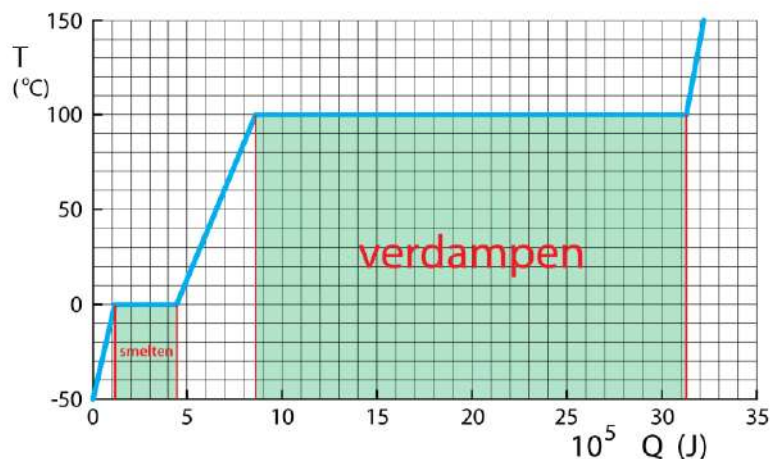
Bereken hoeveel energie er nodig is om de staaf te verwarmen.

- $c = 0,24 \cdot 10^3 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ | $m = 5,0 \text{ kg}$ | $\Delta T = 1235 - 293 = 942 \text{ K}$
- $Q = c \cdot m \cdot \Delta T \rightarrow Q = 0,24 \cdot 10^3 \cdot 5,0 \cdot 942 \rightarrow Q = 1,1304 \cdot 10^6 = 1,1 \cdot 10^6 \text{ J}$

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

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

Bekende faseovergangen zijn het smelten en koken van water. In figuur 15 zie je hoeveel warmte je moet toevoegen om de temperatuur van 1 kg water van -50°C tot $+150^\circ\text{C}$ 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 tussen de watermoleculen volledig gebroken wat veel energie kost.



Figuur 15 1 kg water wordt van -50°C tot $+150^\circ\text{C}$ verwarmd.

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 gemakkelijk buigen, terwijl keramisch materiaal, zoals steen, niet buigt maar breekt. De 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 \(\$\text{N m}^{-2}\$ \)](#)
- 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. Soms wordt de rek in procenten opgegeven.

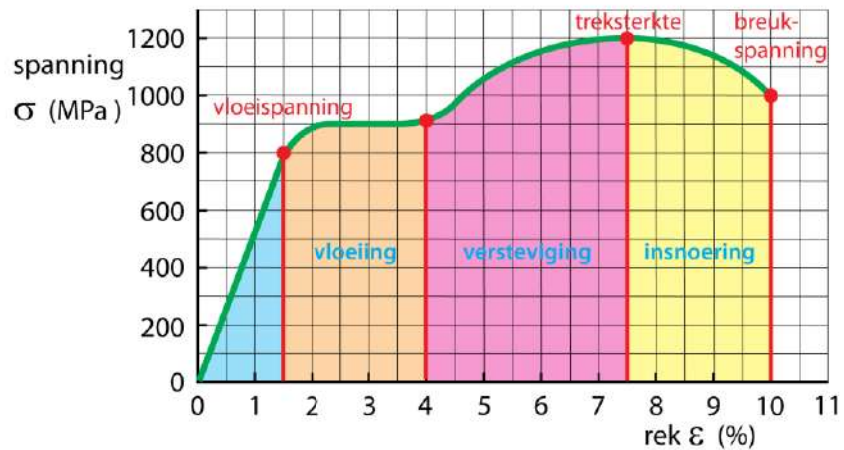
Rek is de verandering van de lengte per meter $\varepsilon = \frac{\Delta \ell}{\ell_0}$

- ε is de rek (geen eenheid, soms in %) [Griekse letter epsilon](#)
- $\Delta \ell$ is de verandering van de lengte (de uitrekking): $\Delta \ell = \ell - \ell_0$
- 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 je oefent hierop een steeds grotere kracht uit. Bij iedere kracht meet je de uitrekking $\Delta \ell$ van de staaf. In figuur 16 zie je een voorbeeld van een (spanning, rek)-diagram van metaaldraad. Er zijn verschillende gebieden te onderscheiden.

Figuur 16 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) –

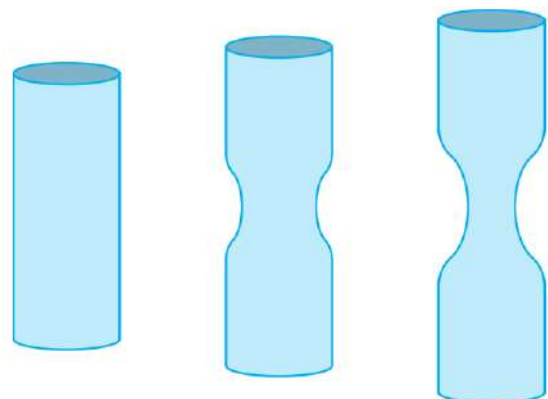
In dit gebied is de vervorming **plastisch**. Hoewel de spanning maar weinig verandert neemt de rek vrij veel toe. Dit verschijnsel heet **vloeien**, omdat het lijkt alsof de vaste stof als een vloeistof stroomt. De spanning waarbij het blauwe elastische gebied overgaat in het oranje plastische gebied 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 vloeiing. 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. Maak je de spanning groter dan het maximum dan kom je in gebied 4 (geel) en breekt de draad.

– gebied 4 (geel) –

In dit gebied is de vervorming **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 17. De spanning waarbij de rek maximaal is en de draad breekt is de **breukspanning**. In figuur 16 breekt de draad als de rek groter is dan 10%. Dit is aangegeven met een rode stip.



Figuur 17 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 veerconstante is afhankelijk van de eigenschappen, zoals de dikte en de lengte van de veer. De elasticiteitsmodulus is alleen afhankelijk van het materiaal waarvan het voorwerp is gemaakt.

**De elasticiteitsmodulus is een eigenschap van een stof.
De veerconstante is een eigenschap van een voorwerp.**

5.6 Functionele materialen

Eigenschappen van stoffen

Eerder in dit hoofdstuk ben je stoffen tegengekomen met speciale eigenschappen. Deze stoffen hebben een functie waarvoor ze gebruikt worden, maar zijn niet voor deze functie ontworpen. Hieronder voorbeelden van stoffeigenschappen die je in dit hoofdstuk bent tegengekomen of die je in latere hoofdstukken tegenkomt.

Gewicht uitoefenen

Stoffen met een grote dichtheid hebben per kubieke meter veel massa.

Warmte geleiden

Stoffen met een grote warmtegeleidingscoëfficiënt kunnen goed warmte geleiden.

Warmte opnemen

Stoffen met een grote soortelijke warmte kunnen per graad temperatuurstijging veel warmte opnemen.

Smeltpunt

Stoffen met een hoog smeltpunt zijn bestand tegen een hoge temperatuur.

Elektriciteit geleiden

Stoffen met een grote soortelijke weerstand kunnen slecht elektriciteit geleiden.

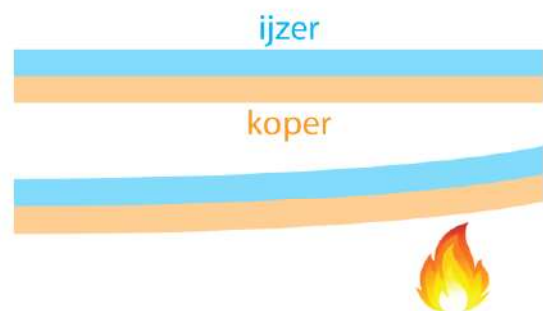
Licht breken

Stoffen met een grote brekingsindex breken het licht onder een grote hoek.

Röntgenstraling en gammastraling tegenhouden

Stoffen met een kleine halveringsdikte houden röntgenstraling en gammastraling tegen.

Soms worden twee of meer stoffen gecombineerd voor een bepaalde functie. Een bekend voorbeeld is een bimetaal, waarbij twee metalen strips met verschillende uitzettingscoëfficiënt op elkaar worden aangebracht. Koper zet meer uit dan ijzer en daarom trekt de strip krom bij verhitting. Zie figuur 18.

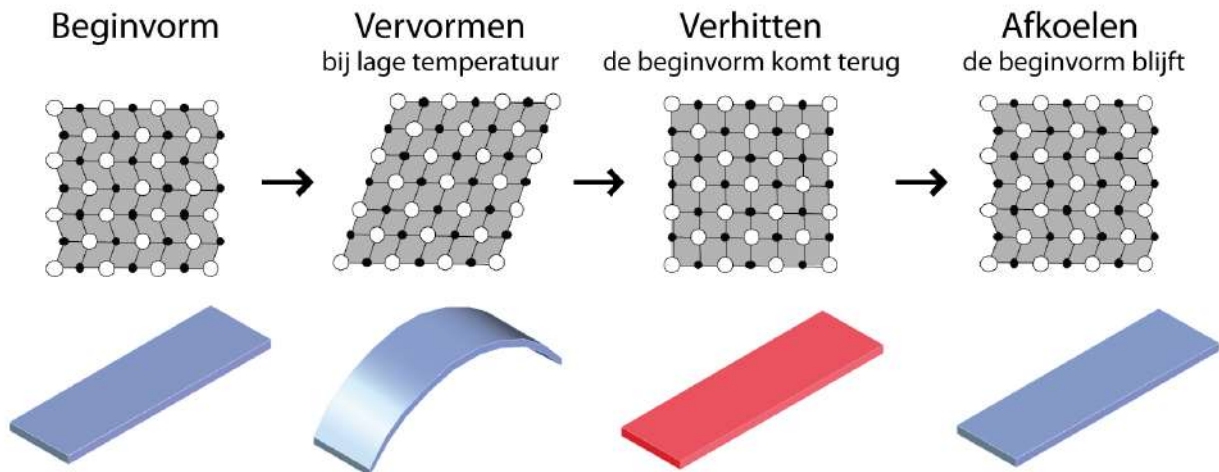


Figuur 18 Bimetaal van ijzer en koper.

In deze paragraaf gaan we het niet hebben over stoffeigenschappen, maar bekijken we een aantal materialen die zijn ontworpen om een bepaalde taak uit te voeren. Dit noemen we **functionele materialen**. Er zijn heel veel van dit soort materialen en ik kan ze onmogelijk allemaal behandelen. Hieronder kom je er een aantal tegen die op dit moment toegepast worden in allerlei "slimme" producten.

Geheugenmetaal

Geheugenmetaal is een mengsel van metalen (een legering) dat bij verwarming terugkeert naar zijn oorspronkelijke vorm. Voorbeelden van geheugenmetalen zijn nikkel-titanium (NiTi) en koper-zink-aluminium (CuZnAl). Het gaat als volgt. Bij een hoge temperatuur breng je een draad van geheugenmetaal in een bepaalde vorm. Nadat het is afgekoeld kan je deze vorm veranderen. Maar de draad heeft zijn vorm onthouden, want bij verhitting keert het terug naar de vorm die het had bij hoge temperatuur. Zie figuur 19.



Figuur 19 Geheugenmetaal keert bij verwarming terug naar zijn oorspronkelijke vorm.

Toepassingen in de geneeskunde:

- voor het verbreden van vernauwde aders (stents)
- voor het rechtekken van ruggenwervels in orthopedische chirurgie
- om tanden recht te zetten (braces)



Figuur 20 Stent in een vernauwde ader.



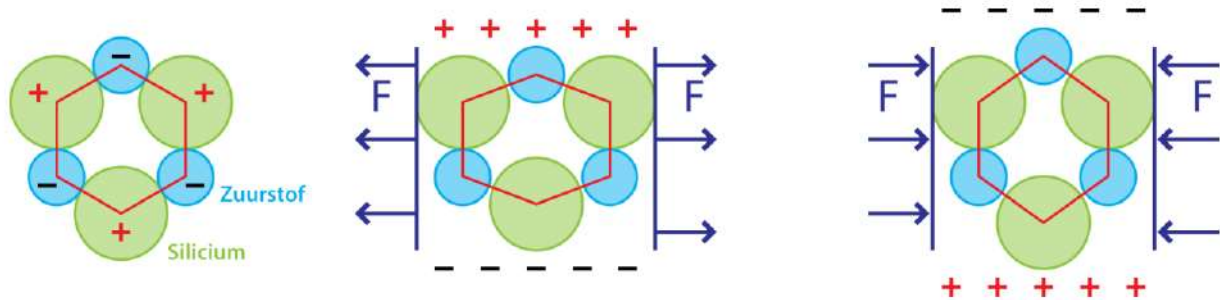
Figuur 21 implantaat van geheugenmetaal.



Figuur 22 Spandraad in een beugel.

Piëzo-elektrische materialen

Piëzo-elektrische materialen krijgen een elektrische lading aan het oppervlak als je er kracht op uitoefent. Andersom werkt het ook: breng je een lading aan op het oppervlak dan vervormt het materiaal. Voorbeelden van piëzo-elektrische materialen zijn lood-zirconaat-titanaat, $\text{Pb} [\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x}] \text{O}_3$, en kwarts, SiO_2 . In figuur 23 zie je het piëzo-elektrische effect in kwarts. De siliciumatomen (groen) hebben een positieve lading en de zuurstofatomen (blauw) hebben een negatieve lading. Oefen je een trekkracht uit dan vervormt het atoomrooster een beetje, waardoor de bovenkant een positieve lading en de onderkant een negatieve lading krijgt. Oefen je een duwkracht uit dan gebeurt het omgekeerde en krijgt de bovenkant een negatieve lading.



Figuur 23 Piëzo-elektrisch effect in kwarts (SiO_2). Links: geen kracht, midden een trekkracht en rechts een duwkracht.

Als je een grote kracht uitoefent kan de lading op het oppervlak van het piëzo-elektrisch kristal zo groot worden dat er een vonk overspringt. Een gasaansteker is hierop gebaseerd. Zie figuur 23, links.

Breng je een lading aan dan vervormt het kristal een beetje. Een elektrisch signaal kan hierdoor worden omgezet in een beweging. Dit wordt gebruikt in keramische luidsprekers. Zie figuur 23, midden.

Haal je de lading weg dan krijgt het kristal weer zijn oorspronkelijke vorm. Hierdoor kan het kristal gaan trillen, zoals gebeurt in een kwartsklok. Na 32.768 trillingen is er precies één seconde verstreken. Zie figuur 23, rechts.

Toepassingen

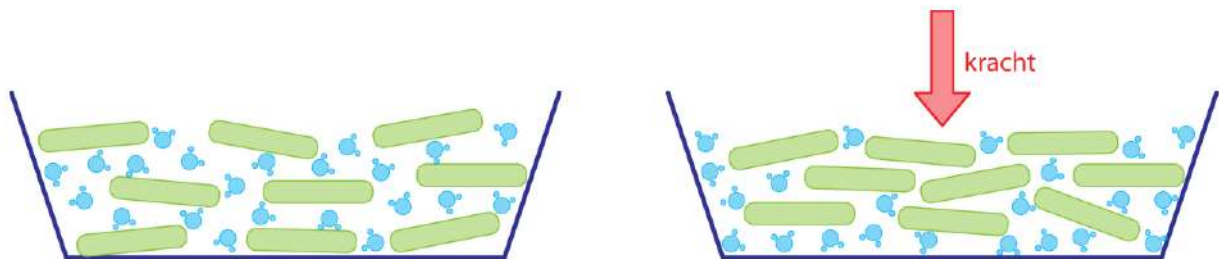
- gasaanstekers
- keramische luidsprekers
- kwartsklokken



Figuur 24 Toepassing van piëzo-elektrische kristallen: gasaansteker (links), keramische speaker (midden) en kwartsklok (rechts).

Niet-newtonse vloeistoffen

Het gemak waarmee een vloeistof kan stromen wordt bepaald door de **viscositeit**. Is de viscositeit groot, dan is de vloeistof stroperig. Bij normale (newtonse) vloeistoffen verandert de viscositeit niet als je kracht op de vloeistof uitoefent. Bij niet-newtonse vloeistoffen is de viscositeit wél afhankelijk van de kracht. Een bekend voorbeeld is maïs-zetmeel (maïzena). Zie figuur 25. Zonder kracht zitten er watermoleculen tussen het zetmeel. Maar als je kracht uitoefent pers je de watermoleculen er tussenuit, waardoor het zetmeel een harde laag vormt met een grote viscositeit.



Figuur 25 Maïzena wordt hard als je er kracht op uitoefent.

Er zijn ook vloeistoffen die juist makkelijker stromen als je er kracht op uitoefent. Dit is het geval bij tomatenketchup. Hou je de fles ondersteboven dan stroomt ketchup vrijwel niet, maar als je schudt oefen je kracht uit en neemt de viscositeit af, waardoor het plotseling uit de fles stroomt.

Ook verf en nagellak zijn niet-newtonse vloeistoffen. Tijdens het aanbrengen oefen je kracht uit, waardoor de viscositeit afneemt. Als de kracht weg is neemt de viscositeit toe, waardoor je minder last hebt van druipen.

Toepassingen

- ketchup
- verf
- nagellak

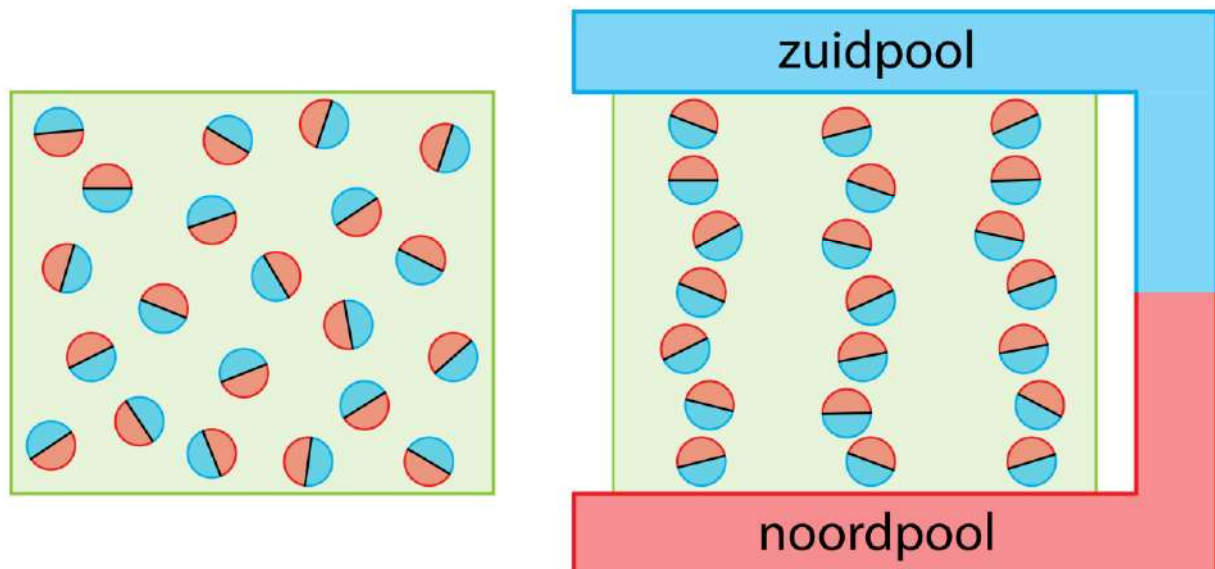


Figuur 26 Voorbeelden van niet-newtonse vloeistoffen: nagellak (links), verf (midden) en nagellak (rechts)

Magnetische vloeistoffen

Magnetische vloeistoffen zijn vloeistoffen waarin kleine magnetische deeltjes zijn toegevoegd aan olie. Omdat deze deeltjes ijzer bevatten heet het ook ferrovloeistof of ferrofluid (Engels). Magneten hebben een noordpool en een zuidpool. Noordpolen stoten elkaar af en zuidpolen stoten elkaar ook af. Aantrekkende kracht ontstaat als een noordpool in de buurt komt van een zuidpool.

Afhankelijk van de toepassing hebben de deeltjes in een magnetische vloeistof een afmeting tussen de 10 nm ($10 \cdot 10^{-9}$ m) en 10 μ m ($10 \cdot 10^{-6}$ m). De magnetische krachten tussen deze deeltjes is te klein om ze stevig aan elkaar te koppelen, waardoor de vloeistof gemakkelijk kan stromen. Dit verandert als de vloeistof in de buurt van een externe magneet komt. De deeltjes gaan zich dan richten, waarbij de noordpolen aan de zuidpolen worden gekoppeld. In figuur 27 zie je hoe dit in zijn werk gaat. Zonder externe magneet hebben de noordpolen (rood) en de zuidpolen (blauw) willekeurige richtingen en kunnen de deeltjes door de vloeistof bewegen. Maar tussen de polen van een externe magneet worden ze aan elkaar gekoppeld en kunnen ze niet meer bewegen, waardoor de vloeistof hard wordt.



Figuur 27 Magnetische vloeistof. Zonder externe magneet (links) en tussen de polen van een externe magneet (rechts).

In luidsprekers wordt de luchtspleet rond de spoel opgevuld met magnetische vloeistof om warmte af te voeren en om natrillen van het membraam te verhinderen.

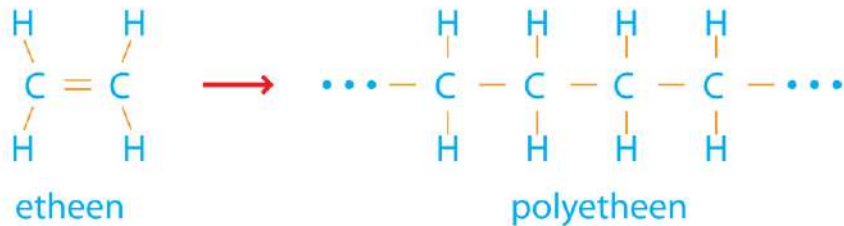
In harde schijven worden magnetische vloeistoffen toegepast als afdichting van de draaias, zodat er geen stof in de harde schijf komt.

Toepassingen

- warmte afvoeren in een luidspreker
- afdichten van de draaias in een harde schijf
- schokdempers waarin het dempvermogen kan worden aangepast

Polymeren

Polymeren zijn ketens van aan elkaar gekoppelde organische moleculen. Een bekend voorbeeld is polyetheen (polyethyleen) waarin etheen moleculen met elkaar zijn verbonden. Zie figuur 28.

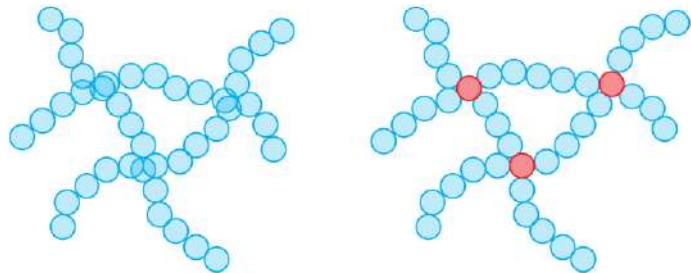


Figuur 28 Polymeer van etheen.

Ongeveer een derde van alle plastic voorwerpen is van polyetheen gemaakt. De eigenschappen van plastic worden bepaald door:

- het molecuul (monomeer) waaruit het plastic is vervaardigd
- de lengte van de ketens
- vertakkingen, waardoor de dichtheid kleiner wordt
- verbindingen tussen de ketens (crosslinking)

Thermoplasten zijn polymeren die zacht worden als de temperatuur toeneemt. Door de polymeerketens met elkaar te verbinden (crosslinking) wordt het materiaal hard zelfs bij hoge temperatuur. Links in figuur 29 liggen de polymeerketens los op elkaar en rechts zijn ze met elkaar verbonden.



Figuur 29 Crosslinken van polymeren.

Geavanceerde polymeren hebben meer dan één basismolecuul. **Blokcopolymeren** hebben segmenten (blokken) van twee of meer polymeren. Met moleculen A en B kun je veel verschillende blokcopolymeren maken die allemaal andere eigenschappen hebben:

–A–B–A–B–A–B–A–B–
–A–A–B–B–A–A–B–B–
–A–A–A–B–A–A–A–B–
–A–B–B–A–B–B–A–B–

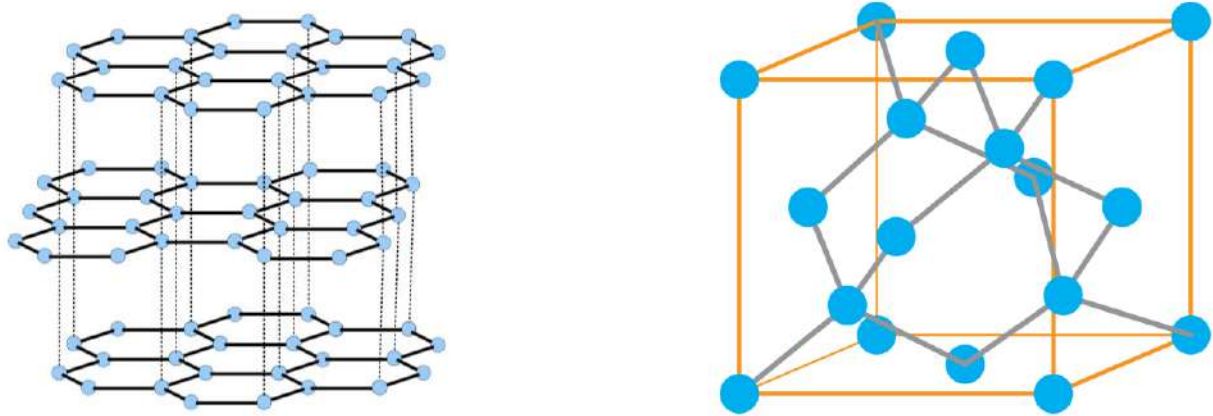
Kunststoffen gemaakt van polymeren worden op grote schaal toegepast. Er zijn eenvoudige voorwerpen, zoals doosjes, flessen en kleding maar ook geavanceerde producten zoals elastomeren (rubber) voor autobanden en lijm, sterke vezels voor helmen en kabels, elektrisch geleidende polymeren en lichtgevende polymeren.

Toepassingen

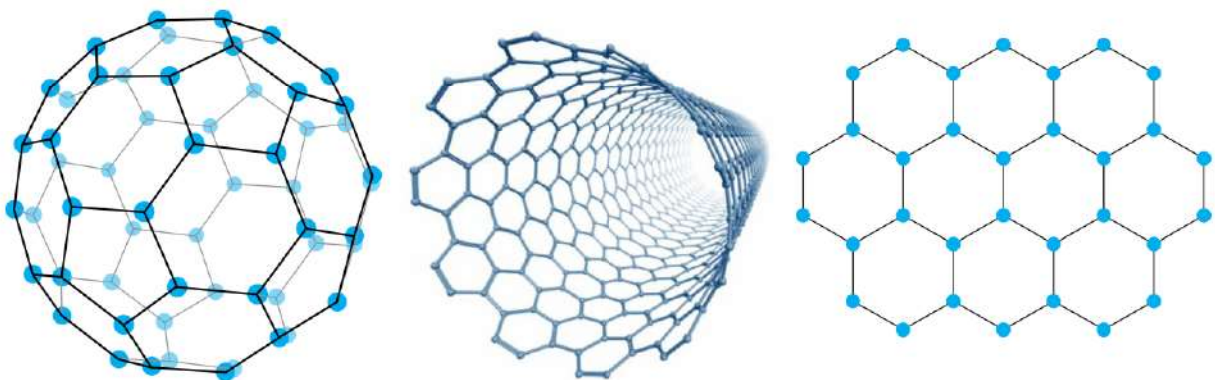
- huishoudelijke artikelen en kleding
- autobanden, lijm, kabels, helmen, kogelwerende vesten
- beeldschermen, zonnecellen

Koolstof

Koolstof in combinatie met waterstof, zuurstof en stikstof is de basis van de organische chemie en daarmee van alle levensvormen op aarde. Los hiervan heeft koolstof van zichzelf ook meerdere vormen. De bekendste zijn grafiet en diamant. Zie figuur 30. In 1985 is het C₆₀ molecuul ontdekt, snel daarna koolstof nanobuizen en in 2004 grafeen. Zie figuur 31.



Figuur 30 Grafiet (links) en diamant (rechts).



Figuur 31 C₆₀ (links), koolstofnanobuis (midden) en grafeen (rechts).

Grafiet wordt toegepast in potloden, als smeermiddel, als elektrode in batterijen, voor het verstevigen van kunststoffen en als carbonfiber.

Diamant wordt gebruikt als edelsteen, als schuurmiddel, als slijtvaste coating op zagen en boren.

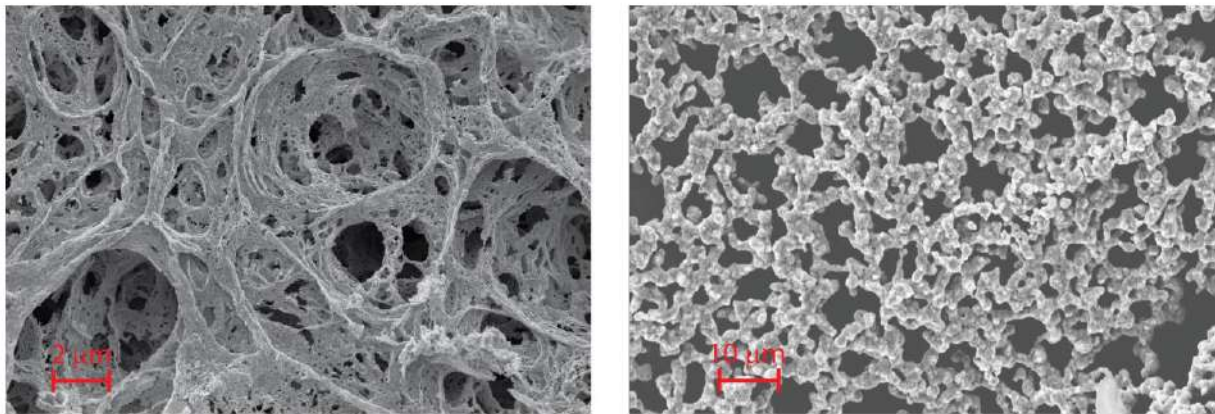
De nieuwe vormen van koolstof hebben veel wetenschappelijke belangstelling. Het is de verwachting dat ze zullen worden toegepast in allerlei hoogwaardige producten.

Toepassingen

- potloden, smeermiddel, elektrode, carbonfiber, elektrisch geleidende polymeren
- edelstenen, schuurmiddel, slijtvaste coatings
- wetenschappelijk onderzoek

Aerogel

Aerogel is een poreus materiaal dat voor meer dan 95% uit lucht bestaat. De dichtheid van aerogel is daarom erg laag. Zoals de naam al zegt wordt aerogel gemaakt van een gel. Een gel is een puddingachtige substantie waarin deeltjes of moleculen in een vloeistof zitten en zwak met elkaar zijn gebonden. De deeltjes of moleculen vormen een netwerk en dit netwerk maakt dat gel eigenschappen heeft van een vloeistof én van een vaste stof. Haargel en gelatine zijn bekende voorbeelden van een gel. Om van een gel een aerogel te maken laat je de vloeistof bij lage temperatuur en lage druk voorzichtig verdampen waarbij het netwerk in stand blijft. De poriën waar eerst vloeistof zat is nu gevuld met lucht (air), vandaar aerogel. Zie figuur 32.



Figuur 32 Aerogel gemaakt van ijzer (links) en van zilver (rechts).

Silica aerogel is een bekend voorbeeld. Het bestaat uit een netwerk van kleine deeltjes SiO_2 (kwarts) die zwak aan elkaar zijn gebonden. Door de sponsachtige structuur voelt het stevig aan maar is het toch kwetsbaar. Silica aerogel is doorzichtig en ontbrandbaar. Zie figuur 33.



Figuur 33 Silica aerogel.

Aerogel gemaakt van metaaldeeltjes worden gebruikt als katalysator voor chemische processen. De reacties vinden plaats aan het oppervlak en door het grote inwendige oppervlak wordt de reactiesnelheid erg groot. Silica aerogel wordt gebruikt als warmte-isolator. Omdat de aerogel maar voor een paar procent uit vaste stof bestaat is warmte-transport nauwelijks mogelijk. Silica aerogel is moeilijk te maken en is daardoor duurder dan bijvoorbeeld glaswol. Maar het isoleert veel beter en bij hoogwaardige toepassing zoals in de ruimtevaart wordt silica aerogel gebruikt.

Toepassingen

- katalysator
- warmte isolatie in de ruimtevaart
- absorberen van vloeistoffen of gassen

5.7 Samenvatting

Grootheden en eenheden

- T is de temperatuur in kelvin (K) of in graden celsius ($^{\circ}\text{C}$)
- ρ is de dichtheid in kilogram per kubieke meter (kg/m^3)
- m is de massa in kilogram (kg)
- V is het volume in kubieke meter (m^3)
- P is de energie die per seconde door een wand gaat (J s^{-1}) of watt (W) **het vermogen**
- 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 K of in $^{\circ}\text{C}$
- d is de dikte van de wand in meter (m)
- Q is de warmte die is opgenomen of is afgestaan (J)
- c is de soortelijke warmte ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$) of ($\text{J kg}^{-1} ^{\circ}\text{C}^{-1}$)
- C is de warmtecapaciteit (J K^{-1}) of ($\text{J }^{\circ}\text{C}^{-1}$)
- σ is de spanning in pascal (Pa) **gelijk aan newton per vierkante meter (N m^{-2})**
- F is de kracht in newton (N)
- ε is de rek (geen eenheid, soms in %)
- $\Delta \ell$ is de verandering van de lengte (de uitrekking) **$\Delta \ell = \ell - \ell_0$**
- ℓ_0 is de oorspronkelijke lengte
- E is de elasticiteitsmodulus in pascal (Pa)

Weten

- Warmte ontstaat uit de arbeid van een wrijvingskracht en uit verbranding van een stof.
- Warmte is arbeid die wordt opgeslagen als inwendige energie.
- Inwendige energie is de bindingsenergie en de kinetische energie van de atomen.
- Temperatuur geeft de gemiddelde kinetische energie van de atomen aan.
- Warmte stroomt spontaan van plaatsen met een hoge temperatuur naar plaatsen met een lage temperatuur.
- temperatuur in kelvin = temperatuur in $^{\circ}\text{C}$ + 273,15
temperatuur in $^{\circ}\text{C}$ = temperatuur in kelvin – 273,15
- De fase van een stof is de verschijningsvorm: vast, vloeibaar, gas of plasma.
- Een faseovergang is de verandering van de fase van een stof.
- vast $\rightarrow$ vloeibaar = **smelten** vloeibaar $\rightarrow$ vast = **stollen**
vloeibaar $\rightarrow$ gas = **verdampen** gas $\rightarrow$ vloeibaar = **condenseren**
vast $\rightarrow$ gas = **sublimeren** gas $\rightarrow$ vast = **rijpen**

- De dichtheid geeft aan hoeveel kilogram stof er in een kubieke meter past.
- Eén gram per cm^3 is gelijk aan 1000 kg per m^3 .
- Warmtegeleiding gebeurt omdat atomen tegen elkaar botsen.
- De energie die per seconde door een wand gaat wordt bepaald door:
 - het materiaal waarvan de wand is gemaakt
 - de oppervlakte
 - het temperatuurverschil
 - de dikte van de wand
- Warmtestroming gebeurt als atomen met veel energie zich over een grote afstand verplaatsen.
- 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 ($20\text{ }^\circ\text{C}$) → rood ($1000\text{ }^\circ\text{C}$) → wit ($5500\text{ }^\circ\text{C}$).
- Warmte-isolatie is het verhinderen van warmtetransport.
- Een warmtepomp verplaatst warmte van lage naar hoge temperatuur.
- De soortelijke warmte is de hoeveelheid warmte die nodig is om de temperatuur van één kg stof één $^\circ\text{C}$ te laten stijgen.
- De warmtecapaciteit is de hoeveelheid warmte die nodig is om een voorwerp één $^\circ\text{C}$ in temperatuur te laten stijgen.
- De spanning is de uitgeoefende kracht per vierkante meter in pascal (Pa)
- De rek is de verandering van de lengte per meter. Geen eenheid, soms in procent %.
- In een (spannings, rek)-diagram kun je aflezen hoeveel spanning nodig is om een bepaalde rek te krijgen. Alleen bij weinig rek is de vervorming elastisch en is er een recht evenredig verband tussen de spanning en de rek.
- De elasticiteitsmodulus is de spanning gedeeld door de rek en is alleen constant bij plastische vervorming met een recht evenredig verband tussen de spanning en de rek.
- De elasticiteitsmodulus is een eigenschap van een stof.
De veerconstante is een eigenschap van een voorwerp.

Formules

$$T_{\text{celsius}} = T_{\text{kelvin}} - 273,15 \quad | \quad T_{\text{kelvin}} = T_{\text{celsius}} + 273,15$$

$$\rho = \frac{m}{V} \quad \text{dichtheid}$$

$$P = \lambda \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{d} \quad \text{hoeveel energie per seconde door een wand gaat}$$

$$Q = c \cdot m \cdot \Delta T \quad \text{hoeveel warmte nodig is om de temperatuur van een stof te veranderen}$$

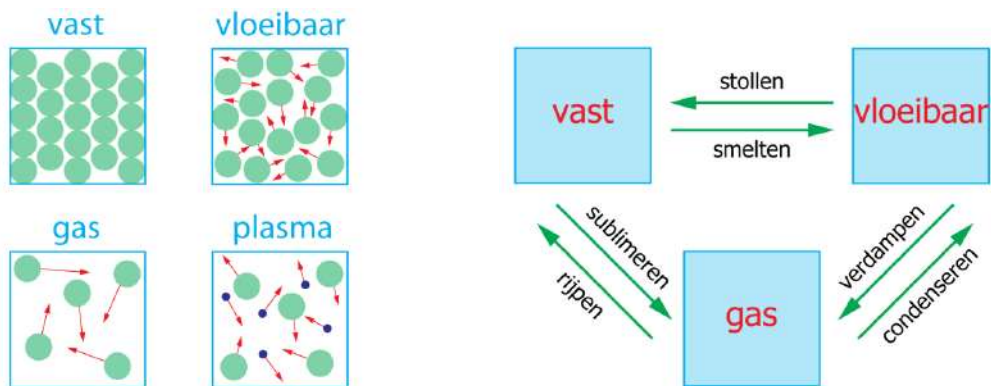
$$Q = C \cdot \Delta T \quad \text{hoeveel warmte nodig is om de temperatuur van een voorwerp te veranderen (C is de warmtecapaciteit)}$$

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad \text{de spanning in pascal (Pa)}$$

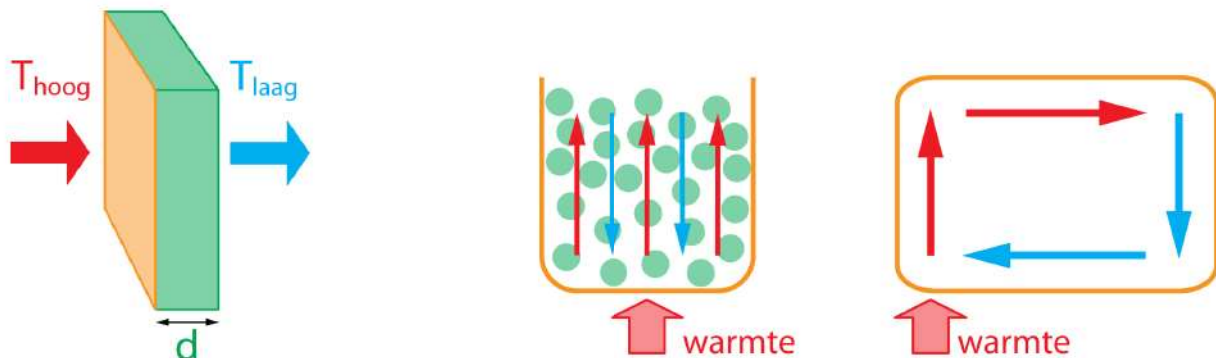
$$\varepsilon = \frac{\Delta \ell}{\ell_0} \quad \text{de rek – geen eenheid soms in procent \%}$$

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad \text{de elasticiteitsmodulus in pascal (Pa)}$$

Figuren

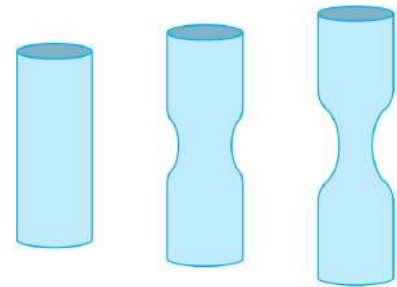
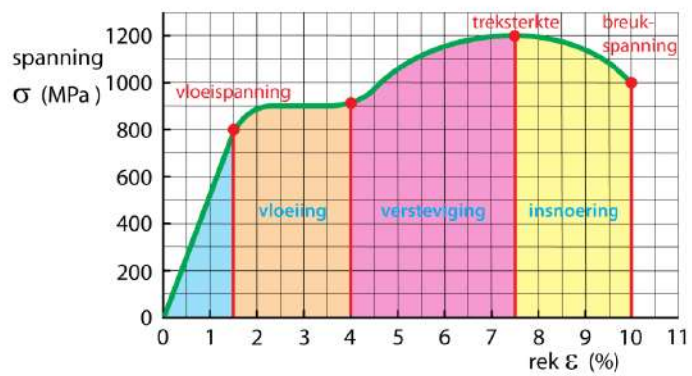
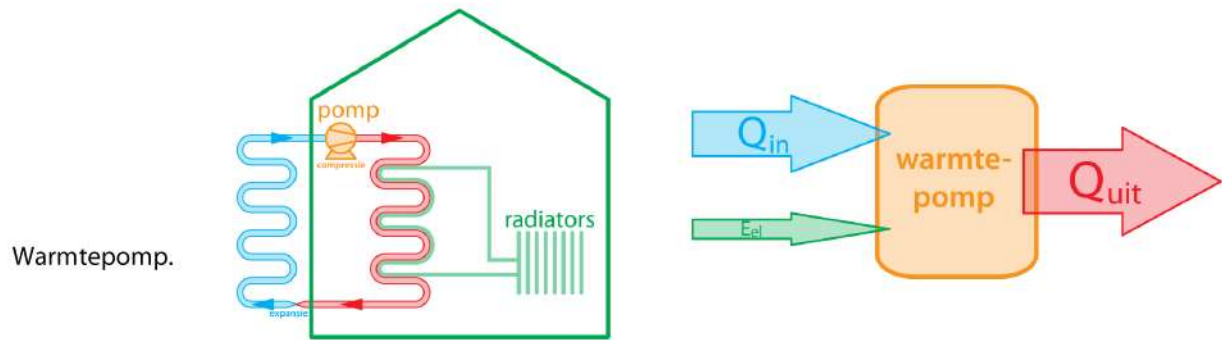


De vier fasen van een stof en de namen van faseovergangen tussen de vaste-, de vloeibare- en de gasfase.



Warmtegeleiding door een wand.

Warmtestroming door convectie.



In een (spannings, rek)-diagram zie hoe een stof zich gedraagt als een kracht wordt uitgeoefend. Bij een kleine kracht is de vervorming elastisch en is er een recht evenredig verband tussen de spanning en de rek.