

Leerdoelen

Wat je moet kennen en kunnen aan het eind van blok 22

- 1 Je moet het begrip verbrandingswarmte kennen en daarmee berekeningen kunnen uitvoeren. [T1] (alleen D-niveau)
- 2 Je moet het verschil weten tussen warmte en temperatuur. [T1, P2]
- 3 Je moet weten dat warmtetransport uit zichzelf alléén plaatsvindt van een plaats met hoge temperatuur naar een plaats met lage temperatuur. [T1]
- 4 Je moet drie manieren kennen waarop warmtetransport kan plaatsvinden. [T1]
- 5 Je moet weten welke rol de molekulen van de tussenliggende stof spelen bij het transport van warmte-energie. [T1]
- 6 Je moet minstens vijf warmtegeleiders en warmte-isolatoren kunnen opnoemen. [T1, W1]
- 7 Je moet weten hoe warmtetransport plaatsvindt bij straling. [T1]
- 8 Je moet drie factoren kennen waarvan afhangt hoeveel straling een voorwerp uitzendt. [T1]
- 9 Je moet weten wat er met straling gebeurt als deze op een donker gekleurd voorwerp valt. [T1]
- 10 Je moet weten welke rol kleur speelt bij de absorptie (opname) en emissie (uitzending) van straling. [T1]
- 11 Je moet het verschijnsel 'uitzetting bij temperatuurverhoging' in de drie fasen kunnen verklaren met het molekuulmodel. [T1]
- 12 Je moet het kromtrekken van een bimetaal kunnen verklaren. [T1]
- 13 Je moet de werking van een vloeistofthermometer kunnen verklaren. [T1]
- 14 Je moet weten dat energie nooit verloren gaat. (De wet van behoud van energie.) [T1, P2]
- 15 Je moet weten wat de soortelijke warmte van een stof is. Je moet de eenheid van soortelijke warmte kennen. [P2, T2]
- 16 Je moet weten wat de warmtecapaciteit van een voorwerp is. Je moet de eenheid van de warmtecapaciteit kennen. [P2, T2]
- 17 Je moet weten hoe je met een proef de warmtecapaciteit van een voorwerp en de soortelijke warmte van een stof kunt bepalen. [P2, T2]
- 18 Je moet de volgende formules kennen, en kunnen toepassen:
 $Q = c \cdot m \cdot \Delta T$ en $Q = C \cdot \Delta T$.
Uit de elektriciteitsleer heb je de formule $E = U \cdot I \cdot t$ nodig. [P2, T2, W2]
- 19 Je moet in gegeven situaties aan kunnen geven welke energieomzetting er plaatsvindt. [P2, T2]
- 20 Je moet weten in welke drie fasen een stof kan voorkomen. [T3]
- 21 Je moet de namen weten van de fase-overgangen tussen vast en vloeibaar, tussen vloeibaar en gasvormig en tussen gasvormig en vast. [T3]
- 22 Je moet weten bij welke fase-overgangen warmte-energie vrijkomt en voor welke fase-overgangen energie nodig is. [T3]
- 23 Je moet weten wat we met het smeltpunt en het stolpunt van een stof bedoelen. [T3]
- 24 Je moet weten wat we met de smeltwarmte, de verdampingswarmte, de condensatiewarmte en de stollingswarmte van een stof bedoelen. [P3, T3, W3]
- 25 Je moet de werking van een koelkast kunnen verklaren met de begrippen verdampingswarmte en condensatiewarmte. [T4, W4]
- 26 Je moet weten waarvoor de condensor en de verdamper in een koelkast dienen. Je moet ook weten waar deze onderdelen zich bevinden. [T4, W4]
- 27 Je moet weten op welke manier aardwarmte kan worden gebruikt voor het verwarmen van huizen. [T4, W4]
- 28 Je moet met behulp van een tekening de werking kunnen uitleggen van een thermostaat, een bimetaalthermometer en een bimetaalzekering. [T5, W5]

Blok 22

Verwarmen en koelen

Basisstof

Inleiding 160

T1 Herhaling en uitbreiding van de stof over de warmteleer 161

W1 164

T2 Soortelijke warmte en warmtecapaciteit 166

W2 169

T3 Energie en fase-overgangen 170

W3 173

T4 De koelkast en aardwarmte 176

W4 177

T5 Nogmaals de c.v.-installatie 178

W5 181

Herhaalstof

H1 Soortelijke warmte en warmtecapaciteit 183

H2 Opgaven over verwarmen en fase-overgangen 186

Extrastof

E1 Onderzoek aan radiatorfolie 188

E2 Het bepalen van de condensatiewarmte van water 188

E3 Isolatie 190

E4 Oefenen met examenopgaven 193



Inleiding

In dit blok over warmte-energie moet je berekeningen uitvoeren aan processen, waarbij overdracht van energie plaatsvindt. Je kunt daarbij gebruik maken van de gegevens in de figuren 1, 2 en 3.

fig. 1

stof	smelt-punt in K	smelt-warmte in kJ/kg	soortelijke warmte in kJ/kg · K	kook-punt in K	verdam-pings-warmte in kJ/kg
aluminium	933	397	0,88		
goud	1337	66	0,13		
koper	1356	205	0,39		
lood	601	25	0,13		
ijzer	1808	276	0,46		
zilver	1234	105	0,24		
messing	1170		0,38		
ijs	273	334	2,2		
alcohol	159	105	2,43	351	841
aniline	267	88	2,05	457	434
benzeen	279	127	1,71	353	393
ether	157	115	2,3	308	377
water	273	334	4,18	373	2260
freon-12	123	—	0,06	243	
lucht	60	—	1,00	80	210
olijfolie	—	—	1,65	570	—
paraffineolie	327	—	2,13	573	—
waterdamp		—	2,0	—	—

fig. 2

Verbrandingswarmte (stookwaarden).

stof	verbrandingswarmte ($\times 10^6$ J/kg)
eikehout	16
steenkool	29
turf	11

verbrandingswarmte ($\times 10^9$ J/m ³)	
alcohol	22
benzine	33
petroleum	36
spiritus	18
stookolie	40

verbrandingswarmte ($\times 10^6$ J/m ³)	
aardgas (gronings)	32
butagas	110
metaan	36
propaan	94
waterstof	11

fig. 3

Belangrijke voorvoegsels

G = 10^9 (giga)
M = 10^6 (mega)
k = 10^3 (kilo)

T1 Herhaling en uitbreiding van de stof over de warmteleer

Dit blok gaat over verwarmen en koelen in huis. Het begrip warmte-energie speelt daarbij een belangrijke rol. In blok 15 heb je al kennis gemaakt met warmte-energie. We hebben warmte-energie daar gedefinieerd als 'energie op transport'. Als je warmte-energie aan een voorwerp toevoegt, stijgt de temperatuur van het voorwerp. De *temperatuur* van een voorwerp is dus een maat voor de warmte-energie die het voorwerp bezit. Die energie is in het voorwerp opgeslagen als (bewegings)energie van de molekulen.

De hoeveelheid *warmte-energie* die bij temperatuurdaling van een voorwerp vrijkomt (of voor temperatuurstijging nodig is), hangt af van:

- de soort stof;
- de massa van die stof.

In blok 15 hebben we voornamelijk gekeken naar de manier waarop warmte zich verplaatst. Uit zichzelf verplaatst warmte zich alleen van een plaats met een hoge naar een plaats met een lage temperatuur.

We hebben ook gekeken naar wat er bij temperatuurverandering met de molekulen gebeurt. Als de temperatuur stijgt gaan de molekulen sneller bewegen; hun gemiddelde snelheid neemt dan toe. Als de temperatuur daalt, gaan de molekulen langzamer bewegen; hun gemiddelde snelheid neemt dan af.

Geleiding, stroming en straling

Geleiding, stroming en straling zijn de drie manieren waarop warmte-energie zich kan verplaatsen.

Geleiding verloopt het beste bij vaste stoffen, vooral bij metalen. De molekulen geven de trillende beweging door 'botsingen' aan elkaar door. De molekulen zelf blijven daarbij op hun plaats in het rooster.

Stoffen die slecht geleiden noemen we *isolatoren*. Deze stoffen zijn de laatste jaren steeds belangrijker geworden, omdat bewust omgaan met energie en een lage energierekening voor bedrijven en gezinnen erg belangrijk zijn. Lucht en stoffen waar veel lucht in zit (zoals kurk, tempex, glaswol, purschuim en noppenfolie) zijn goede isolatoren.

Stroming van warmte vindt plaats in vloeistoffen en gassen. Bij verwarming zullen de molekulen sneller gaan trillen. Ze duwen elkaar opzij, omdat ze meer ruimte nodig hebben. De stof zet daardoor uit, zodat de dichtheid kleiner wordt (dit geldt ook voor vaste stoffen). Door de verandering van volume en dichtheid treedt bij verwarming van gassen en vloeistoffen een stroming op. De verwarmde stof (gas of vloeistof) stijgt op ten opzichte van de omringende koudere stof. Zowel bij geleiding als stroming spelen de molekulen dus een belangrijke rol.

Voor *straling* zijn géén molekulen nodig. Straling van de zon komt immers door het luchtledige heelal naar ons toe.

Een stralingsbron zendt méér straling uit naarmate:

- de bron een hogere temperatuur bezit;
- de bron een groter oppervlak heeft;
- dat oppervlak ruwer is en donkerder van kleur.

Zo kaatst radiatorfolie meer warmte van de radiator terug dan een muur waar geen folie op zit; een zwart geëmailleerde braadpan wordt heter dan een roestvrijstalen braadpan.

In huis kunnen we op verschillende manieren rekening houden met warmtestraling. Glimmende en licht gekleurde voorwerpen reflecteren warmtestraling, terwijl donkere doffe voorwerpen juist straling absorberen.

De geabsorbeerde straling wordt opgeslagen als bewegings-energie van de molekulen: de temperatuur van het voorwerp stijgt dus.

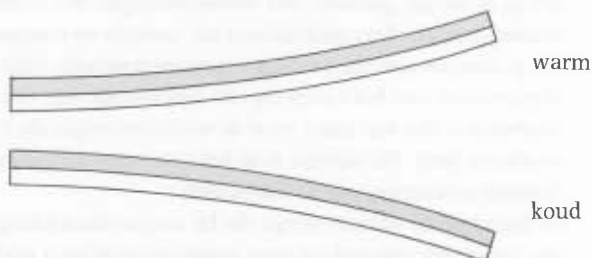


Uitzetting

Als de temperatuur stijgt, gaan de molekulen sneller bewegen en duwen ze elkaar opzij. De stof zet hierdoor uit. Toepassingen hiervan zijn het bimetaal en de thermostaat. Een bimetaal is een dun plaatje metaal dat bestaat uit twee verschillende op elkaar gewalde metalen. Het ene metaal zet meer uit dan het andere. Hierdoor trekt de metaalstrip krom als de temperatuur verandert: bij verwarming in de ene richting en bij afkoeling in de andere richting (figuur 4).

fig. 4

Een bimetaalstrip in warme en koude toestand.



Rendement

Bij het energiegebruik van apparaten speelt het rendement een belangrijke rol. Het rendement (symbool η , spreekt uit *êta*) geeft aan hoeveel procent van de toegevoerde energie (of van het toegevoerde vermogen) nuttig wordt gebruikt. Het rendement wordt uitgedrukt in procenten.

$$\text{Rendement} = \frac{\text{nuttige energie}}{\text{toegevoerde energie}} \cdot 100\%$$

In formulevorm:

$$\eta = \frac{E_{\text{af}}}{E_{\text{op}}} \cdot 100\%$$

Voor het rendement geldt ook:

$$\text{Rendement} = \frac{\text{nuttig vermogen}}{\text{toegevoerd vermogen}} \cdot 100\%$$

In formulevorm:

$$\eta = \frac{P_{\text{af}}}{P_{\text{op}}} \cdot 100\%$$

Voorbeeld 1

Hoe groot is het rendement van een gloeilamp van 75 W, als de lichtopbrengst 4 W is?

Oplossing:

$$\eta = \frac{P_{\text{af}}}{P_{\text{op}}} \cdot 100\% \Rightarrow \eta = \frac{4}{75} \cdot 100\% \Rightarrow \eta = 5,3\%$$

Voorbeeld 2

Bereken het rendement van een elektriciteitscentrale met een elektrisch vermogen van 1200 MW, als daarvoor een thermisch vermogen (warmtevermogen) van 3000 MW nodig is.

Oplossing:

$$\eta = \frac{P_{\text{af}}}{P_{\text{op}}} \cdot 100\% \Rightarrow \eta = \frac{1200}{3000} \cdot 100\% \Rightarrow \eta = 40\%$$

Voorbeeld 3

Het rendement van een benzinemotor is 30%. Bereken eerst de energie die de benzine moet leveren en dan het benzineverbruik, als een ritje met de auto 15,0 MJ aan nuttige energie kost.

Oplossing:

$$\text{Rendement } \eta = 30\% \Rightarrow$$

$$\eta = \frac{E_{\text{af}}}{E_{\text{op}}} \cdot 100\% \Rightarrow 0,30 = \frac{15,0}{E_{\text{op}}} \Rightarrow E_{\text{op}} = \frac{15,0}{0,30} = 50 \text{ MJ.}$$

Er is voor dit ritje dus $\frac{50 \cdot 10^6}{33 \cdot 10^9} = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 = 1,5 \text{ liter}$ benzine nodig.

Energiebronnen en de wet van behoud van energie

De meeste energie die we in het dagelijks leven gebruiken, komt uit fossiele brandstoffen (steenkool, aardolie en aardgas) of – in kerncentrales – uit uranium. Een ander deel van de energie krijgen we uit zonnestraling, waterkracht en windkracht. Met behulp van deze energiesoorten kunnen we weer andere energiesoorten opwekken, zoals elektrische energie. Bij alle energie-omzettingen geldt de wet van behoud van

energie. Er gaat dus nooit écht energie verloren. Maar wél wordt altijd een deel ervan omgezet in een energiesoort, die we niet nuttig kunnen gebruiken. Meestal is dit warmte-energie.

Zo gaat bij het opwekken en transporteren van elektrische energie veel warmte ‘verloren’ bij:

- het maken van stoom en het aandrijven van de generator in de centrale;
 - het transport in de hoog- en laagspanningsleidingen;
 - het omhoog- en omlaagtransformeren van de spanning.
- In een elektromotor wordt weliswaar 90% van de energie uit

het net in bewegingsenergie omgezet, maar gerekend vanaf de fossiele brandstof is het rendement erg laag. Wij gebruiken veel elektrische energie omdat deze zo gemakkelijk is te transporteren, maar vanwege het lage rendement blijft het onze duurste energiesoort.

Verbrandingswarmte (Alleen voor D-niveau)

Je kunt de hoeveelheid energie die bij de verbranding van fossiele brandstoffen vrijkomt berekenen, als je de verbrandingswarmte van de brandstof weet. De *verbrandingswarmte* is de hoeveelheid energie die vrijkomt als 1 kg vaste brandstof (of 1 m³ vloeibare of gasvormige brandstof) wordt verbrand (tabel figuur 2).

In formulevorm geldt voor de verbrandingswarmte (afgekort tot vbw):

- bij vaste stoffen: $\text{vbw} = \frac{Q}{m}$ (m is de massa in kg, Q is

de totale hoeveelheid vrijgekomen energie);

- bij vloeistoffen en gasen: $\text{vbw} = \frac{Q}{V}$ (V is het volume in m³).

De eenheid van verbrandingswarmte is J/kg of J/m³.

Voorbeeld

De vbw van steenkool is 16 MJ/kg.

Bereken de energie die vrijkomt bij de verbranding van 50 kg steenkool.

Oplossing:

$$\text{vbw} = \frac{Q}{m} \Rightarrow Q = \text{vbw} \cdot m \Rightarrow = 16 \cdot 50 = 800 \text{ MJ.}$$

Temperatuurmeting

Temperatuur meten we meestal met een vloeistofthermometer. De werking van de thermometer berust op het feit dat de vloeistof in reservoir en capillair méér uitzet dan het glas. De vloeistof is meestal kwik of alcohol. Die vloeistoffen zetten regelmatig uit bij temperatuurstijging. Omdat kwik een metaal is (en dus beter warmte geleidt dan alcohol) is het de beste thermometervloeistof. Een nadeel is dat nog steeds veel kwik uit kapotte thermometers in het milieu terecht komt. In de natuurkunde worden twee temperatuurschalen gebruikt: de schaal van Celsius en die van Kelvin.

Celsius ging bij het opstellen van zijn schaal uit van de faseovergangen van water. Als nulpunt (0 °C) nam hij de temperatuur van smeltend ijs; de temperatuur van kokend water noemde hij 100 graden (100 °C).

Kelvin ging van de schaal van Celsius uit, maar nam als nulpunt de laagst mogelijke temperatuur: het absolute nulpunt. Dit is de temperatuur waarbij de molekulen niet meer bewegen. Die temperatuur ligt 273° beneden de temperatuur van smeltend ijs, dus 273° beneden het nulpunt op de celsiusschaal. Daardoor is de temperatuur in kelvin altijd 273° hoger dan de temperatuur in °celsius.

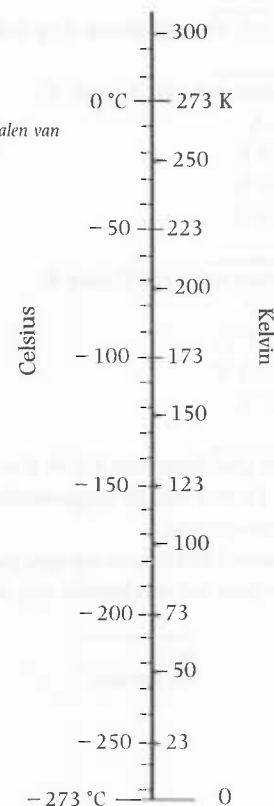
Er geldt dus:

$$T_{\text{kelvin}} = T_{\text{celsius}} + 273 \text{ (figuur 5).}$$

$$-273^\circ\text{C} = 0 \text{ K (absolute nulpunt) en } 0^\circ\text{C} = 273 \text{ K.}$$

De temperatuur in kelvin wordt wel de *absolute temperatuur* genoemd.

fig. 5
De temperatuurschalen van Celsius en Kelvin.



Gebruik zonodig de gegevens uit de tabellen in figuur 1 en 2.

- 1 Pierre verstoekt in zijn open haard op een avond 5 kg eikehout. Het rendement van zijn open haard is 10%.
 - a Welke energieomzettingen vinden er plaats?
 - b Hoeveel energie komt er vrij bij de verbranding van 5 kg eikehout?
 - c Waarvoor wordt in deze situatie de nuttige energie gebruikt?
 - d Hoeveel energie verdwijnt er bij Pierre die avond door de schoorsteen?

fig. 6
Een open haard.



- 2 Noem vier stoffen die warmte-energie goed geleiden. Leg ook uit hoe ze worden toegepast.
- 3 Noem vier isolatoren. Leg ook uit hoe ze worden toegepast.
- 4 Reken om van K naar °C.
 - a 23 K.
 - b 150 K.
 - c 300 K.
 - d 650 K.

- 5 Reken om van °C naar K.
 - a 27 °C.
 - b -23 °C.
 - c -153 °C.
 - d 107 °C.

- 6 Een gloeilamp van 60 W levert per seconde 3 J zichtbaar licht. De rest van de toegevoerde energie wordt omgezet in warmte-energie.
 - a Hoeveel elektrische energie gebruikt de lamp per seconde?
 - b Bereken het rendement van de lamp.

fig. 7
Een gloeilamp.



7 Gronings aardgas kost per m³ f 0,44. Stookolie kost per m³ f 1100,-. Brandhout kost per kg f 0,10.

- a Bereken voor de drie genoemde brandstoffen de prijs van 1 MJ energie.
- b Welke brandstof kun je het best gebruiken om een huis te verwarmen? Licht je antwoord toe met berekeningen.

8 Bij vloerverwarming stroomt warm water van de centrale verwarming door buizen die onder de tegelvloer liggen (figuur 8).

Leg uit waarom juist bij deze manier van verwarmen isolatie van de laag onder de buizen van groot belang is.

fig. 8
Vloerverwarming.



9 In een zonnecollector (figuur 9) wordt stralingsenergie van de zon omgezet in warmte-energie. In de collector lopen koperen leidingen, waarin het water wordt verwarmd.

fig. 9
Een huis met zonnecollectoren.



- a In welke kleur kan de collector het best worden uitgevoerd?
- b Waarom zitten in de collector koperen leidingen en geen leidingen van plastic?
- c Aan welke kant (noord, zuid, oost of west) van het huis levert een zonnecollector het hoogste rendement?

10 Centrale-verwarmingsbuizen op zolder worden vaak geïsoleerd.

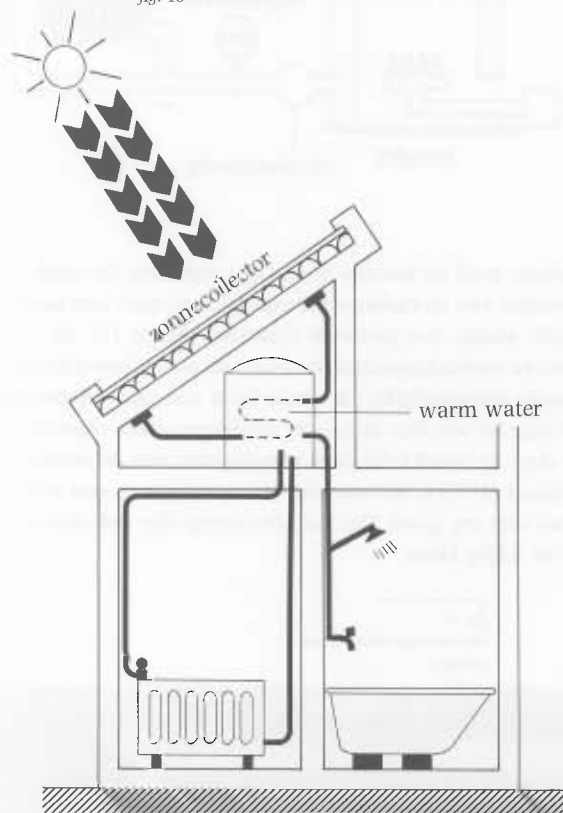
a Waarom? Bedenk twee redenen.

b Welke stoffen kunnen hiervoor het best worden gebruikt?

11 (Examen 1982 I D)

In een zonnehuis levert de zon een deel van de energie die in het huishouden nodig is. De zonne-energie wordt opgenomen door de zonnecollector A (figuur 10). De zonnecollector bestaat uit een stelsel buizen waardoor water stroomt. Het water wordt warmer en staat deze energie weer af aan het leidingwater in opslagvat B. Het water dat zo in B is verwarmd, wordt gebruikt in het huishouden. In figuur 10 is dit schematisch weergegeven.

fig. 10



a De zonnecollector is geschilderd. Bij welke combinatie van kleur en glans neemt de collector de zonnestraling het beste op?

A wit glanzend.

B zwart glanzend.

C wit mat.

D zwart mat.

Motiveer je antwoord.

Het water wordt getransporteerd door leidingen. In die leidingen verliest het water energie op plaatsen waar we dat liever niet hebben. Dat energieverlies willen we verminderen. We vragen ons af of we daarvoor:

- de leidingen wel of niet met schuimplastic moeten bekleden;

- de leidingen moeten maken van materialen die de warmte goed of slecht geleiden;

- moeten proberen de temperatuur van het water zo hoog of zo laag mogelijk te maken.

b Beschrijf wat je in elk van de drie bovenstaande gevallen zou doen om het energieverlies zo klein mogelijk te houden. Licht je antwoorden toe.

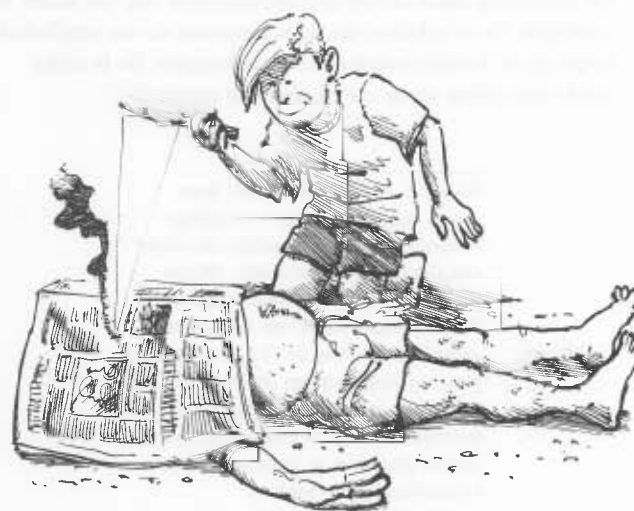
12 Voor een onderzoek, waarin de kosten van elektrisch koken en van koken op gas worden vergeleken, brengt men 2 liter water van 20 °C aan de kook. Daarvoor is 669 kJ nodig. Het gasfornuis heeft een rendement van 85%. Aardgas kost 50 cent per m³. Het elektrische fornuis heeft een rendement van 90%. De elektrische energie kost 30 cent per kWh.

a Welke manier van koken is het voordeligst? Licht je antwoord toe met een berekening.

Bij de produktie van elektrische energie met behulp van aardgas levert de centrale een rendement van 45%.

b Laat door een berekening zien dat koken op aardgas véél minder energie kost.

13 Als in de zomer de zon schijnt kun je met een brandglas een gat in de krant branden. De grote zwarte letters en donkere foto's vliegen gemakkelijker in brand dan de witte gedeeltes tussen de tekst. Geef hiervoor een verklaring.



Soortelijke warmte en warmtecapaciteit

In T2 worden twee nieuwe begrippen uit de warmteleer ingevoerd: de soortelijke warmte en de warmtecapaciteit. Om deze begrippen duidelijk te maken, behandelen we de centrale verwarming (figuur 11). Ook de geiser en de boiler worden behandeld, maar niet zo uitgebreid als de c.v.-installatie.

De belangrijkste onderdelen van een centrale verwarmingsinstallatie (c.v.-installatie) zijn:

- de ketel met de brander;
- de waterpomp;
- de radiatoren;
- de verbindingsbuizen;
- de kranen;
- de thermostaat;
- het expansievat.

In de *ketel* wordt water verwarmd door verbranding van gas of olie. Het verwarmde water wordt vanaf de ketel via buizen naar de radiatoren gepompt. In de radiatoren geeft het warme water energie af aan de omgeving.

Het duurt altijd even voordat het water in de installatie op temperatuur is. Hoe lang dit duurt hangt af van:

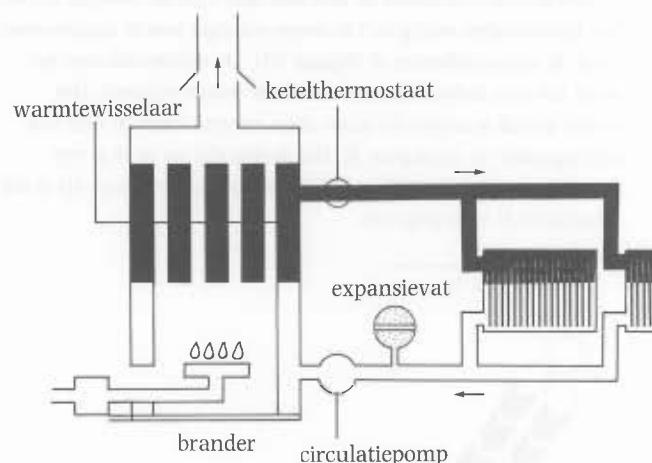
- het vermogen van de brander;
- de hoeveelheid water en de begintemperatuur van het water;
- de temperatuur in het huis;
- de in de installatie gebruikte materialen.

De *waterpomp* dient om de circulatiesnelheid van het water te verhogen. De schakelaar die de waterpomp in- en uitschakelt, is tevens de hoofdschakelaar voor de brander. De brander werkt dus alléén als de circulatiepomp aanstaat.

Oude c.v.-installaties hadden geen pomp, maar heel dikke verbindingsbuizen; er moest 'natuurlijke circulatie' van het water plaatsvinden. (Warm water stijgt in koud water, koud water daalt in warm water; zie ook *Geleiding, stroming en straling* in T1.) Die circulatie ging erg langzaam, en die dikke buizen waren ook nog duur en lelijk in huis. Bovendien moest de ketel altijd op het laagste punt van de installatie staan, bijvoorbeeld in de kelder.

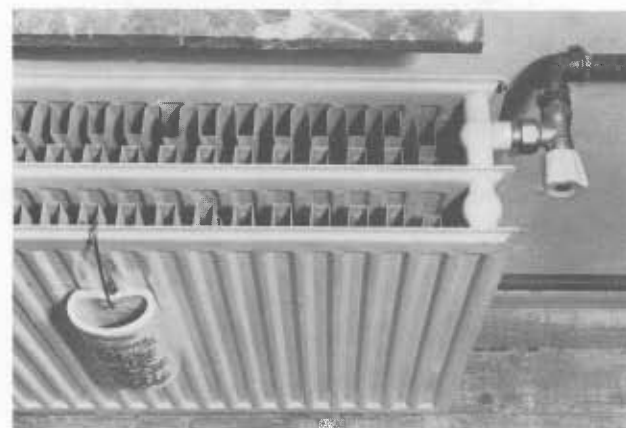
De pomp maakt een snellere circulatie mogelijk en dus het gebruik van dunne (goedkopere) en minder lelijke buizen. De ketel hoeft niet meer op het laagste punt te staan; in sommige ruimten (bijvoorbeeld de keuken) wordt de warmte die de ketel afgeeft dan ook nog nuttig gebruikt.

fig. 11
Een schematische tekening van een c.v.-installatie.



De *radiator* geeft de warmte af aan de omgeving. De totale oppervlakte van de radiator bepaalt de capaciteit; hoe meer parallelle platen, hoe groter de capaciteit (figuur 12). De U-vormige verbindingstukken tussen de platen bevorderen een snelle warmteafgifte. De ideale kleur van een radiator zou zwart zijn; hij zou dan de meeste stralingswarmte afgeven. Maar door de betrekkelijk lage temperatuur van de radiator (maximaal 80 °C) is het voordeel ten opzichte van een witte radiator niet erg groot. Het voordeel weegt dan ook niet op tegen de lelijke kleur.

fig. 12
Het bovenaanzicht van een radiator.



Het *expansievat* ('expansie' betekent 'uitzetting') maakt het mogelijk dat het water uitzet als het wordt verwarmd, zonder dat in het (gesloten) systeem een te grote druk ontstaat.

Vroeger moest het expansievat op het hoogste punt van de installatie (op zolder) zijn gemonteerd, met een overloopleiding naar de dakgoot. Tegenwoordig gebruikt men vaak een grote holle metalen bol, die door een sterk rubbermembraan in tweeën is gedeeld. In de ene helft zit het water dat met de buizen in verbinding staat, in de andere helft zit lucht. Het membraan gaat bol staan als het water uitzet. Dit expansievat hoeft geen 'overloop' te hebben en kan op elke plaats in de installatie worden gemonteerd (zie figuur 18 op pagina 172).

De *thermostaat* regelt de temperatuur en is meestal in de woonkamer geplaatst. Hij moet op een tochtvrije plaats zijn gemonteerd. De werking ervan wordt in T5 besproken.

Aan een goede c.v.-installatie stellen we de volgende eisen:

- een voldoende hoge kamertemperatuur, óók bij een lage buitentemperatuur;
- een goede verdeling van de warmte over de diverse vertrekken;
- een hoog rendement van de ketel;
- het snel bereiken van de gewenste temperatuur;
- weinig energieverliezen (maar geen bevroeringsgevaar voor buizen op zolder of in de kelder!).

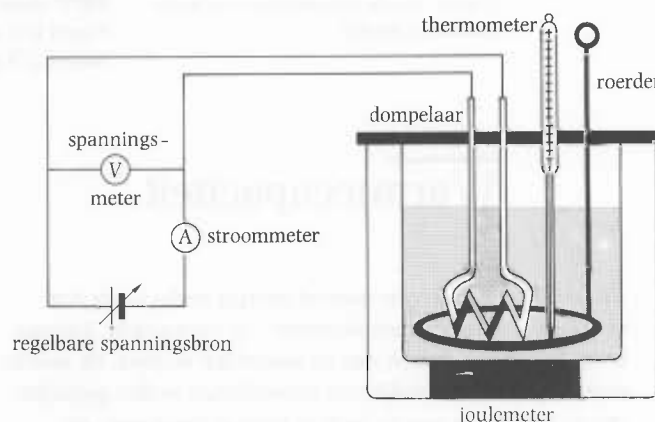
Welke materialen kunnen het best gebruikt worden voor een c.v.-installatie?

Voor het beantwoorden van deze vraag is uitgebreid materiaalonderzoek nodig. Tijdens het practicum hebben we daarvoor de warmtemeter gebruikt.

Een warmtemeter (joulemeter) bestaat uit een goed geïsoleerd vat waarmee we warmte-eigenschappen van stoffen kunnen onderzoeken. Zo kan met de warmtemeter worden onderzocht hoeveel energie nodig is om een bepaalde hoeveelheid stof een bepaald aantal graden te verwarmen.

We gebruiken daarvoor de opstelling van figuur 13.

fig. 13
Energietelling met een warmtemeter



De spannings- en stroommeter zijn nodig om de hoeveelheid energie te kunnen berekenen die via de elektrische dompelaar wordt toegevoerd. Je gebruikt hiervoor de formule $E = U \cdot I \cdot t$

Daarin is

- E : de energie in J;
- U : de spanning in V;
- I : de stroomsterkte in A;
- t : de tijd in s.

Door de toegevoerde energie worden de warmtemeter en de stof in de warmtemeter verwarmd. Beide stijgen evenveel in temperatuur, mits je voortdurend roert.

Tijdens de metingen proberen we de energieverliezen aan de omgeving zoveel mogelijk te beperken, zodat de meetresultaten zo betrouwbaar mogelijk zijn.

Soortelijke warmte

Als van een hoeveelheid stof de toegevoerde energie, de temperatuurstijging en de massa bekend zijn, kun je daaruit de soortelijke warmte van die stof bepalen. De soortelijke warmte van een stof is de energie die nodig is om 1 kg van die stof 1 graad te verwarmen. Het symbool van soortelijke warmte is c ; de eenheid is $\text{J/kg} \cdot \text{K}$ (spreek uit: joule per kilogram per kelvin). De soortelijke warmte geeft ook aan hoeveel energie 1 kg van een stof afgeeft als deze 1°C of 1 K in temperatuur daalt.

Het verband tussen energie, soortelijke warmte, massa en temperatuurverandering is in formulevorm:

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

Daarin is:

- Q de energie in J;
- c de soortelijke warmte in $\text{J/kg} \cdot \text{K}$;
- m de massa in kg;
- ΔT de temperatuurverandering in K (of in $^\circ\text{C}$).

Voor de temperatuurverandering maakt het niet uit of je de temperatuur berekent in kelvin of in graad celsius. De grootte van de verandering is in beide gevallen hetzelfde.

Voorbeeld

Het stolpunt van water is 0°C ofwel 273 K . Het kookpunt van water is 100°C ofwel 373 K . Tussen 0°C en 100°C zit 100 graden. Tussen 273 K en 373 K zit 100 K.

Een temperatuurstijging van 1 celsiusgraad komt overeen met 1 kelvingraad, dus 100 celsiusgraden komen overeen met 100 kelvinggraden.

Warmtecapaciteit

Als we willen berekenen hoeveel energie nodig is om een voorwerp – zoals een warmtemeter – te verwarmen, kunnen we geen gebruik maken van de soortelijke warmte. De meeste voorwerpen zijn namelijk van verschillende stoffen gemaakt. Om de benodigde energie toch te kunnen berekenen, gebruiken we de *warmtecapaciteit* (symbool: C). De *warmtecapaciteit* (C) is de hoeveelheid energie die nodig is om een voorwerp 1°C of 1 K in temperatuur te doen stijgen. De eenheid is J/K .

De warmtecapaciteit van een voorwerp kunnen we berekenen als we weten uit welke stoffen het voorwerp bestaat en wat de massa van deze stoffen is. Als een gevulde warmtemeter uit aluminium en water bestaat, geldt voor de warmtecapaciteit:

$$C = (c \cdot m)_{\text{alu}} + (c \cdot m)_{\text{water}}$$

Het verband tussen energie, warmtecapaciteit en temperatuurverandering is in formulevorm:

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

Daarin is

- Q de hoeveelheid energie in J;
- C de warmtecapaciteit in J/K ;
- ΔT de temperatuurverandering in $^{\circ}\text{C}$ of K .

Voorbeeld 1

Hoeveel energie is nodig om 5,0 kg water 10 K te verwarmen? De soortelijke warmte van water is $4,18\text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$. Dat betekent dat 4,18 kJ energie nodig is om 1 kg water 1 K te verwarmen.

Om 5,0 kg water 1 K te verwarmen is dan $5,0 \cdot 4,18\text{ kJ} = 20,9\text{ kJ}$ nodig.

Om 5,0 kg water 10 K te verwarmen is $10 \cdot 20,9\text{ kJ} = 209\text{ kJ}$ nodig.

De formule geeft uiteraard hetzelfde resultaat.

$$Q = c \cdot m \cdot \Delta T \Rightarrow Q = 4,18 \cdot 5,0 \cdot 10\text{ kJ} = 209\text{ kJ}.$$

Voorbeeld 2

Een joulemeter heeft een warmtecapaciteit van 200 J/K .

Hoeveel warmte komt vrij als de temperatuur van de joulemeter 15 K daalt?

Bij een daling van 1 K komt 200 J vrij. Bij een daling van 15 K komt $15 \cdot 200\text{ J} = 3000\text{ J} = 3,0\text{ kJ}$ vrij.

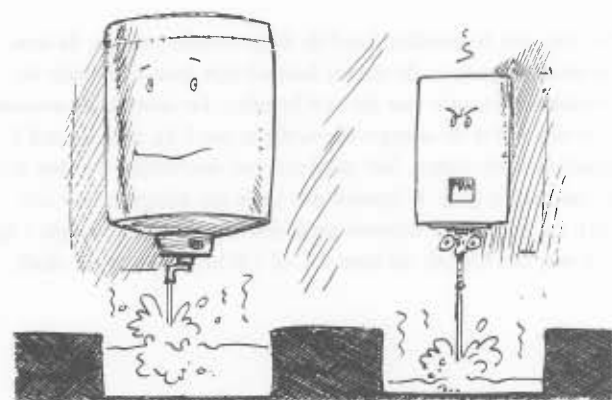
Met de formule wordt dit:

$$Q = C \cdot \Delta T \Rightarrow Q = 200 \cdot 15 = 3000\text{ J} = 3,0\text{ kJ}.$$

Voor het op temperatuur brengen van de c.v.-installatie is veel energie nodig. Buizen, radiatoren, ketel en water moeten worden verwarmd. Deze warmte-energie gaat echter niet verloren maar wordt weer aan het huis afgegeven. 's Avonds kun je, ongeveer een half uur voordat je gaat slapen, de thermostaat op een lagere stand zetten. De radiatoren geven de in het water opgeslagen energie nog af aan het huis, zodat de temperatuur slechts langzaam daalt.

Warm water

Warm water maken we in huis op diverse manieren. Als we thee zetten, plaatsen we een ketel met water op het fornuis. Voor de afwas draaien we de warmwaterkraan open en tappen water uit de boiler, of we verwarmen het water in een geiser. In een geiser wordt het water verwarmd op het moment dat we het water nodig hebben. Een boiler bestaat uit een geïsoleerd vat waarin 24 uur per dag het water op een constante temperatuur wordt gehouden (bijvoorbeeld 75°C).



Je kunt niet zomaar zeggen dat warmwatervoorziening met een boiler beter of slechter is dan met een geiser. Beide manieren hebben hun voor- en nadelen. De tapsnelheid is bij een boiler ongeveer tien liter per minuut en bij een geiser zes liter per minuut; een bad is dus sneller vol als je een boiler gebruikt. Nadeel van een boiler is dat de warmwatervoorraad beperkt is. Een geiser kan een ononderbroken stroom warm water leveren en dat is handig als veel mensen na elkaar willen douchen. Een ander verschil is dat warmwatervoorziening met een boiler meer energie kost dan met een geiser.

fig. 14
Een boiler.



Een geiser wordt 'gestookt' op aardgas. De werking is ongeveer gelijk aan de werking van een c.v.-ketel. Maar het grote verschil is dat in een geiser steeds nieuw water wordt verwarmd, terwijl in een c.v.-installatie het water wordt rondgepompt.

Boilers worden óf verwarmd met aardgas, óf met elektrische energie. Bij elektrische verwarming wordt vaak gebruik gemaakt van periodes waarin de elektrische energie goedkoop is (het laag- of nachttarief).

fig. 15
Een geiser.



Blok 22

W2

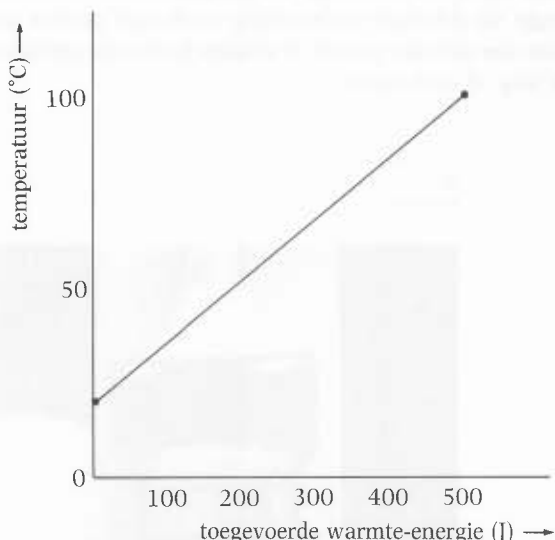
Gebruik zonodig de gegevens uit de tabel in figuur 1.

- 1 Wat is er vergeten in de volgende uitspraak?
'Voor het verwarmen van water is meer energie nodig dan voor het verwarmen van messing.'
- 2 Bereken de energie die nodig is om 20 g lood 15 K te verwarmen.
- 3 Aan 30 g koper wordt 400 J warmte-energie toegevoerd. Bereken de temperatuurstijging van het koper.
- 4 Om 80 g van een stof 20 K te verwarmen, is 3520 J nodig.
 - a Bereken de soortelijke warmte van deze stof.
 - b Welke stof zou het kunnen zijn?

- 5 Op een boerenbedrijf legt de eigenaar een waterslang door een broeiende mesthoop. Het water wordt verwarmd door de energie die in de mesthoop vrijkomt en stijgt daardoor 6 K in temperatuur. Per uur loopt 5000 liter water door de slang. Bereken hoeveel energie er per uur aan de mesthoop wordt onttrokken.

6 Figuur 16 geeft het verband weer tussen de toegevoerde energie en de temperatuur van 13,6 g van een bepaalde stof.

fig. 16
Het verband tussen de temperatuur en de toegevoerde energie.



a Bereken met behulp van de grafiek de soortelijke warmte van de stof.

b Welke stof is het waarschijnlijk?

7a Waarin zit het verschil tussen de soortelijke warmte van een stof en de warmtecapaciteit van een voorwerp?

b Kun je ook spreken van de warmtecapaciteit van een blokje messing? Zo ja, hoe kun je die dan berekenen?

8 Voor het verwarmen van een kamer is 7,0 MJ energie nodig. De temperatuur stijgt hierdoor van 7 naar 19 °C. Tijdens het verwarmen wordt 1,0 MJ energie naar buiten uitgestraald.

Bereken de warmtecapaciteit van deze kamer.

9 Leg uit waarom bij strenge vorst het water in een diep meer veel later bevriest dan het water in een ondiepe sloot.

10 Een blokje lood met een massa van 80 g wordt geruime tijd in een bak met kokend water gehangen.

a Wat is dan de temperatuur van het blokje lood?

Hierna wordt het blokje snel in een warmtemeter (warmtecapaciteit 125 J/K) geplaatst. De warmtemeter is gevuld met 150 g water. De temperatuur van het water stijgt hierdoor tot 25 °C.

b Hoeveel is het blokje lood in temperatuur gedaald?

c Bereken de hoeveelheid energie die het blokje lood heeft afgestaan.

d Bereken hoeveel energie nodig is om de warmtemeter (met water) 1 K in temperatuur te laten stijgen.

e Bereken de begintemperatuur van de warmtemeter met inhoud.

11 Een theekopje met een warmtecapaciteit van 50 J/K heeft een temperatuur van 20 °C. In het kopje schenken we 150 gram thee met een temperatuur van 90 °C.

a Bereken de temperatuur van het geheel. Je mag aannemen dat geen energie aan de omgeving wordt afgestaan.

b Waaruit blijkt in de praktijk dat wél energie aan de omgeving wordt afgestaan?

12 Uit een mengkraan loopt water van 36 °C in een leeg bad van 20 °C. Door de koudwaterleiding stroomt tijdens het tappen 15 liter water van 18 °C. Gelijktijdig stroomt een hoeveelheid water van 72 °C door de warmwaterleiding. De warmtecapaciteit van de badkuip is 1000 J/K. De temperatuur van badkuip plus water wordt 36 °C.

Bereken hoeveel water van 72 °C werd gemengd met het water van 18 °C.

13 In T2 staat dat de c.v.-ketel vroeger – toen men geen circulatiepomp gebruikte – steeds op het laagste punt van de installatie moest staan wegens toepassing van 'natuurlijke circulatie'. Leg dit uit.

14 Waarom mag de thermostaat in de woonkamer niet op een tochtige plaats zijn gemonteerd?

Blok 22

T3 Energie en fase-overgangen

Ook in T3 wordt de centrale verwarming besproken om de stof te verduidelijken.

In de c.v.-ketel is een schakelautomaat gemonteerd die ervoor zorgt dat de temperatuur van het ketelwater niet te hoog wordt. Als de ingestelde 'ketelwatertemperatuur' is bereikt,

schakelt deze automaat de gastoevoer uit, zodat de brander dooft. De ketelwatertemperatuur wordt ingesteld op 75 tot 85 °C (als het vriest) of op 50 tot 60 °C (bij minder lage buitentemperaturen).

Waarom deze verschillen in ketelwatertemperatuur?

Als het vriest 'vraagt' het huis meer warmte. Maar als het

ketelwater 55 °C is, geven de radiatoren véél te weinig energie af. Er ontstaat onvoldoende stroming van warme lucht omdat het temperatuurverschil tussen de radiatoren en de omgeving te klein is. Bovendien zenden minder warme radiatoren minder stralingswarmte uit. Het gevolg is dat het huis onbehaaglijk koud blijft.

Verhogen we nu de ketelwatertemperatuur naar 80 °C, dan ontstaat bij de radiatoren niet alleen meer stroming van verwarmde lucht (omdat het temperatuurverschil met de omgeving groter is), maar de radiatoren geven óók meer stralingswarmte af. Het gevolg is dat er in een kortere tijd meer warmte aan de omgeving wordt overgedragen; de kamer is nu snel op temperatuur.

Als het buiten niet erg koud is, heeft een hoge ketelwatertemperatuur twee nadelen:

- het rendement van de verwarming wordt onnodig lager;
- de radiatortemperatuur varieert tussen erg heet (veel stralingswarmte) en koud (geen straling). Het hete ketelwater geeft in korte tijd veel warmte af, maar omdat de vraag naar warmte klein is, duurt het lang voordat de brander weer aanslaat. Daardoor schommelt de kamertemperatuur sterk rond de ingestelde waarde.

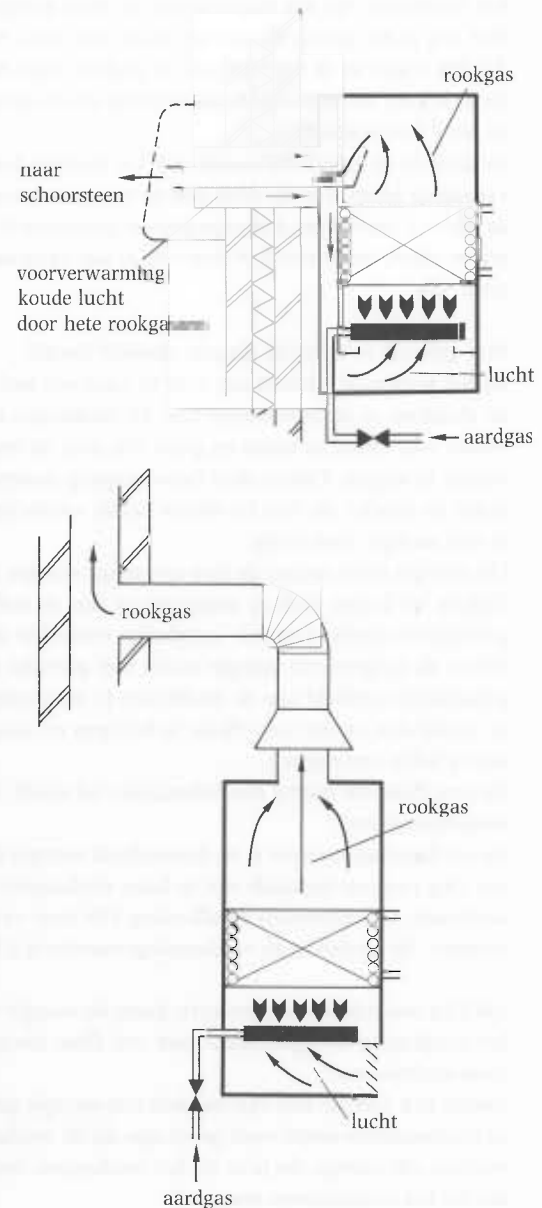
Als de ketelwatertemperatuur lager is, slaat de brander vaker aan. De temperatuur van de radiatoren varieert dus niet zo sterk meer (behaaglijk!) én het rendement verbetert.

Het rendement van de c.v.-ketel wordt bepaald door het temperatuurverschil tussen het ketelwater en de rookgassen. (De rookgassen ontstaan bij de verbranding van gas of olie en verwarmen het ketelwater.) Hoe groter dit temperatuurverschil is tussen het ketelwater en de rookgassen, des te beter is de warmte-overdracht aan het water. Nu is bij de brander de temperatuur van de rookgassen eigenlijk altijd even hoog, ongeveer 250 °C, ongeacht de buitentemperatuur. Voor een groot temperatuurverschil tussen de rookgassen en het ketelwater (en dus een hoog rendement) moet de temperatuur van het ketelwater laag zijn. In de winter is de consequentie dan wel dat je met een lage kamertemperatuur genoeg moet nemen, want een lage ketelwatertemperatuur betekent: lauw-warme radiatoren.

De rookgassen van een zogenaamde HR-ketel (HR staat voor hoog rendement) zijn een stuk minder heet dan de gassen van een gewone ketel. Dit komt doordat de rookgassen een langere weg volgen langs warmtewisselaars, waarin de koude lucht (die nodig is voor de

verbranding) en het koud geworden retourwater (dat op weg is naar de ketel) worden voorverwarmd. De voorverwarmde lucht zorgt voor een gunstiger verbrandingsproces en het voorverwarmde water is sneller op (ketelwater)temperatuur. De warmte-energie uit de brandstof wordt zo dus economischer gebruikt.

fig. 17
Schematische tekening van een c.v.-ketel met en zonder voorverwarming van koude lucht.



Hoewel de temperatuur van het ketelwater hoog moet zijn als het buiten vriest, mag het ketelwater nooit 100°C worden. De reden hiervoor is eenvoudig. De temperatuur waarbij water kookt is bij normale druk (10^5 Pa) 100°C . Het kookpunt van het ketelwater ligt iets hoger omdat de druk groter is, maar dan nog is het gevaarlijk om het water tot 100°C te verhitten. Als het water in de ketel om een of andere reden toch zou gaan koken, veroorzaakt de waterdamp een zo grote druk dat de ketel kan ontploffen.

De druk in de installatie neemt ook toe doordat het water bij verhitting uitzet. Om de druk niet te ver op te laten lopen, is in elke c.v.-installatie een expansievat gemonteerd. Als het water uitzet, loopt een deel daarvan in het expansievat (figuur 18).

Wat gebeurt er eigenlijk als een vloeistof kookt?

Bij het kookpunt (voor water 100°C) gaat een stof over van de vloeibare in de gasvormige fase. De molekulen komen verder van elkaar te zitten en gaan vrij door de beschikbare ruimte bewegen. Tijdens deze fase-overgang moeten de molekulen de kracht, die hen bij elkaar houdt, overwinnen. Daar is veel energie voor nodig.

Die energie moet tijdens de fase-overgang worden toegevoerd. Tijdens het koken blijft de temperatuur van de stof gelijk; de gemiddelde snelheid van de molekulen verandert dus niet. Ofwel: de toegevoerde energie wordt niet gebruikt om de gemiddelde snelheid van de molekulen te verhogen, maar om de molekulen verder van elkaar te brengen en aan de vloeistof te laten ontsnappen.

De grootheid die hierbij een belangrijke rol speelt, is de *verdampingswarmte*.

De verdampingswarmte is de hoeveelheid energie die nodig is om 1 kg van een bepaalde stof te laten verdampen bij het kookpunt. We gebruiken de afkorting VW voor verdampingswarmte. De eenheid van verdampingswarmte is J/kg.

Als 1 kg waterdamp condenseert, komt de energie die tijdens het verdampen is opgenomen weer vrij. Deze energie heet de *condensatiewarmte*.

Omdat ook hier de wet van behoud van energie geldt, moet de condensatiewarmte even groot zijn als de verdampingswarmte. De energie die je er bij het verdampen instopt, komt dus bij het condenseren weer vrij.

Voor de fase-overgangen van vast naar vloeibaar en omgekeerd geldt hetzelfde, alleen spreken we dan van smelt- en stolwarmte. Dus: tijdens smelten en stollen blijft de temperatuur constant, en smeltwarmte en stolwarmte zijn even groot.

fig. 18

Een c.v.-ketel met expansievat.



Vloeistoffen verdampen niet alleen bij het kookpunt maar ook bij lagere temperaturen. Een plas water droogt bijvoorbeeld bij elke temperatuur op. Het gaat alleen sneller als de temperatuur hoger is. Bij een lagere temperatuur is meer energie nodig voor de verdamping, want de molekulen zitten dan dichter bij elkaar. Ze trekken elkaar dus meer aan, zodat er meer energie nodig is voordat ze aan de vloeistof kunnen ontsnappen.

Boven de vloeistof zit – bij elke temperatuur – dus ook damp van die vloeistof. Hoe hoger de temperatuur is, hoe meer vloeistofdamp boven de vloeistof zit. Die damp bezit dus ook een dampdruk, net als de lucht. Als de temperatuur stijgt, wordt die dampdruk steeds groter. Bij een bepaalde temperatuur is de dampdruk even groot als de luchtdruk (gemiddeld: $1,02 \cdot 10^5 \text{ Pa}$). Er kan dan niet alleen aan het oppervlak, maar ook *in* de vloeistof verdamping plaatsvinden: in de vloeistof ontstaan dan dampbellen. We zeggen dan dat de vloeistof kookt. Koken is dus: verdampen door de hele vloeistof heen. Een vloeistof kookt als de druk van de damp boven die vloeistof even groot is als de luchtdruk.

Waarom kookt ether bij 35°C , alcohol bij 78°C en water bij 100°C ? Omdat bij die temperaturen de dampdruk boven die vloeistoffen even groot is geworden als de luchtdruk.

Condensatie-, smelt- en stolwarmte kun je op precies dezelfde manier definiëren als de verdampingswarmte. Bijvoorbeeld: de stolwarmte is de hoeveelheid energie die vrijkomt als 1 kg van een bepaalde vloeistof stolt bij het stolpunt.

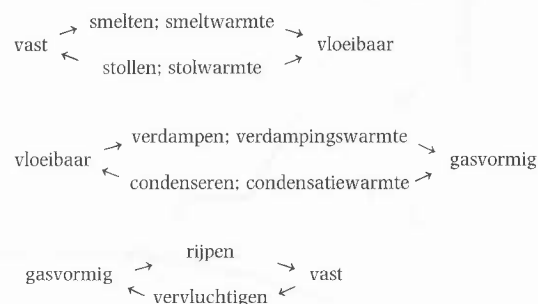
Verder moet je weten:

- voor het smelten en verdampen is energie nodig;
- bij stollen en condenseren komt energie vrij.

In het schema van figuur 19 staat een overzicht van de fase-overgangen.

fig. 19

De fase-overgangen.



Blok 22

W3

1a Geef de definitie van smeltwarmte.

b Geef de definitie van condensatiewarmte.

2 Leg uit waarom voor de meeste stoffen de verdampingswarmte groter is dan de smeltwarmte. (Bedenk wat er in beide gevallen met de afstanden tussen de molekulen gebeurt.)

3 Beschrijf een proef waarmee je de verdampingswarmte van water kunt bepalen.

4 De smeltwarmte van ijs is 334 kJ/kg.

a Wat betekent dit?

b Bereken de energie die nodig is om een ijsblok van 10 kg bij een temperatuur van 0 °C te laten smelten.

c Je laat 10 kg ijs smelten in een kamer van 60 m³. Bereken hoeveel de temperatuur van de lucht in de kamer hierdoor daalt. Neem aan dat er geen warmte-uitwisseling is met de muren en de omgeving van de kamer.

5 Bereken hoeveel energie nodig is om 200 g alcohol te laten verdampen bij het kookpunt.

6 Bij de hoogovens koelt vloeibaar ijzer af en stolt. Bereken hoeveel energie bij het stolpunt vrijkomt als 10 000 kg ijzer stolt.

7 Een hoeveelheid ijs van 100 g en 243 K wordt verwarmd tot water van 323 K.

a Is er tussen 243 K en 323 K sprake van een fase-overgang? Licht je antwoord toe.

b Bereken hoeveel energie nodig is om dit ijs te verwarmen tot het smeltpunt.

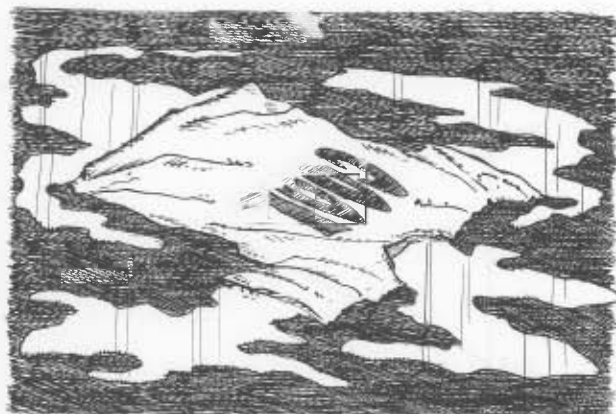
c Bereken hoeveel energie nodig is om het ijs te smelten.

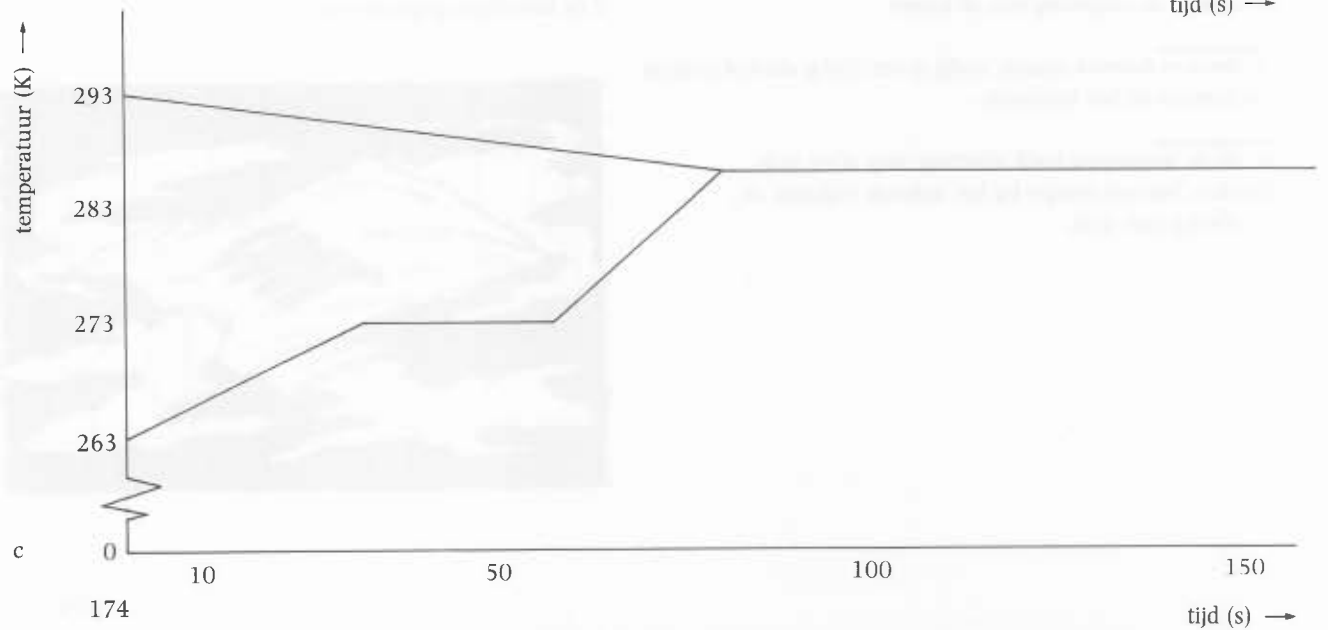
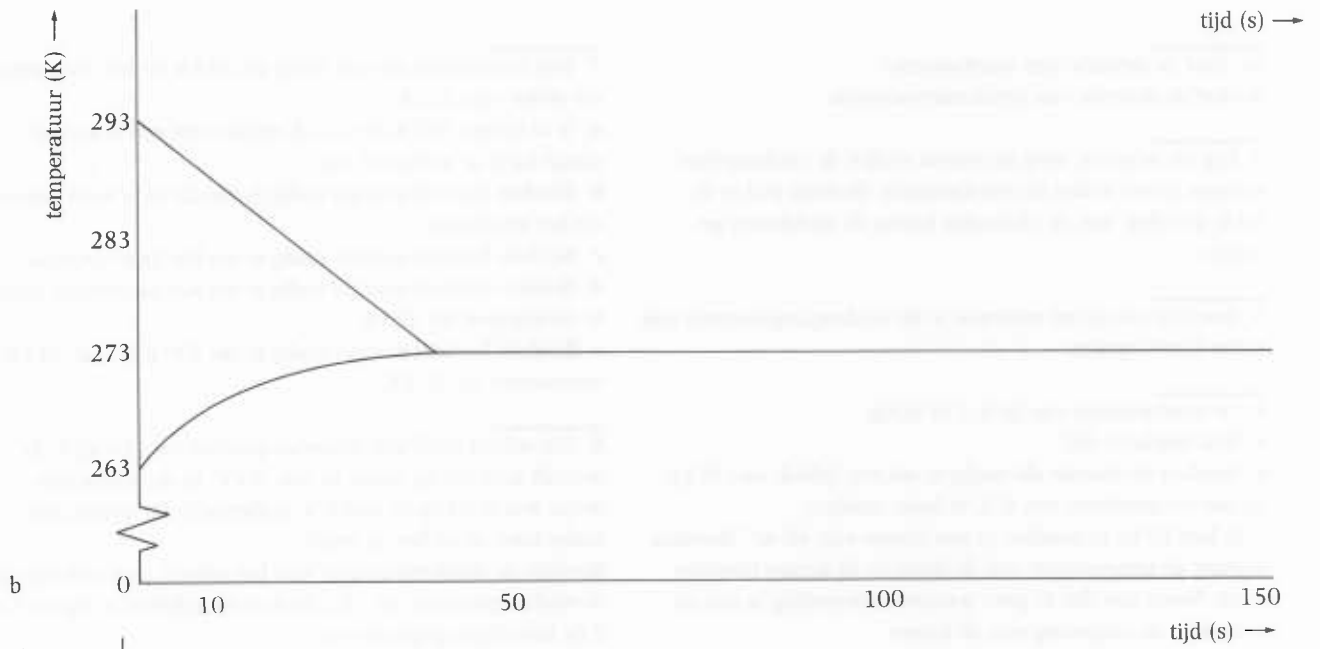
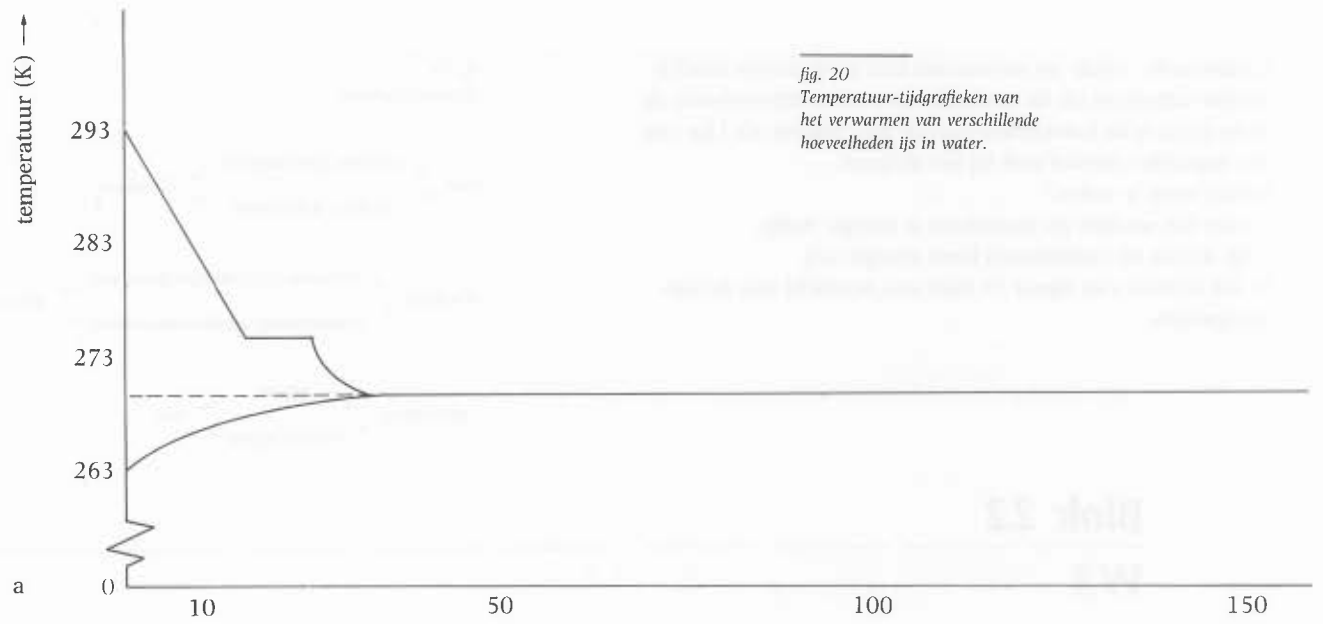
d Bereken hoeveel energie nodig is om het smeltwater verder te verwarmen tot 323 K.

e Bereken hoeveel energie nodig is om 100 g ijs van 243 K te verwarmen tot 323 K.

8 Een schaal heeft een warmtecapaciteit van 2,0 kJ/K. Er bevindt zich 2,0 kg water in van 30 °C. In de schaal met water wordt 100 g ijs van 0 °C gedompeld. De schaal met water koelt af en het ijs smelt.

Bereken de eindtemperatuur van het geheel. (Aanwijzing: stel de eindtemperatuur op x K.) Zoek in de tabellen in figuur 1 en 2 de benodigde gegevens op.





9 Esther heeft een bakje met water en een brok ijs van 50 g. De temperatuur van het water is 293 K. De temperatuur van het ijs is 263 K. Esther doet het ijs in het bakje met water en blijft zo lang mogelijk roeren. In figuur 20a zijn de temperatuur van het water en de temperatuur van het ijs uitgezet tegen de tijd.

a Is na afloop de hoeveelheid ijs groter dan, gelijk aan of kleiner dan 50 g? Licht je antwoord toe.

Als Esther begint met andere hoeveelheden water in het bakje, ontstaan andere diagrammen. Twee daarvan zijn getekend in figuur 20b en 20c.

b In welk van de drie gevallen is de oorspronkelijke hoeveelheid water in het bakje het grootst? Licht je antwoord toe.

c Beantwoord vraag a ook voor de diagrammen in figuur 20b en 20c.

10 Hennie gooit twee even grote ijsblokjes met een temperatuur van -5°C in een glas frisdrank van 20°C . Zijn zus Rita gooit in een zelfde glas limonade één ijsblokje van -10°C dat even groot is als één ijsblokje van Hennie. Rita beweert dat haar limonade evenveel in temperatuur daalt als de limonade van Hennie.

Leg uit dat zij ongelijk heeft.

11 De centrale verwarming moet warmte transporteren van de ketel naar de kamers van het huis. Het hete water geeft in de radiatoren zijn warmte af via straling en via verwarming van de lucht door geleiding.

a Moet de verwarmingsvloeistof in de buizen een hoge of een lage soortelijke warmte bezitten om snel veel warmte te kunnen overdragen? Licht je antwoord toe.

b Vergelijk nu de soortelijke warmte van de vloeistoffen die in de tabel in figuur 1 vermeld staan. Zoek met behulp van je antwoord op vraag a uit welke van de vermelde vloeistoffen de meest geschikte verwarmingsvloeistof is voor een c.v.-installatie. Licht je keuze toe.

12 Judith verwarmt 1600 g van een vaste stof met behulp van een elektrische kookplaat. Het vermogen van de kookplaat is 300 W. Tijdens het verwarmen wordt alle energie die de kookplaat afgeeft overgedragen aan de vaste stof. Judith leest tijdens het verwarmen elke minuut de temperatuur af. Van deze waarnemingen heeft zij het diagram in figuur 21 gemaakt.

Tussen de tijdstippen $t = 5$ minuten en $t = 10$ minuten stijgt de temperatuur niet.

a Bereken de smeltwarmte van de stof.

Bij 120°C begint de stof te koken. In de periode van $t = 18$ minuten tot $t = 24$ minuten verdampt de stof helemaal.

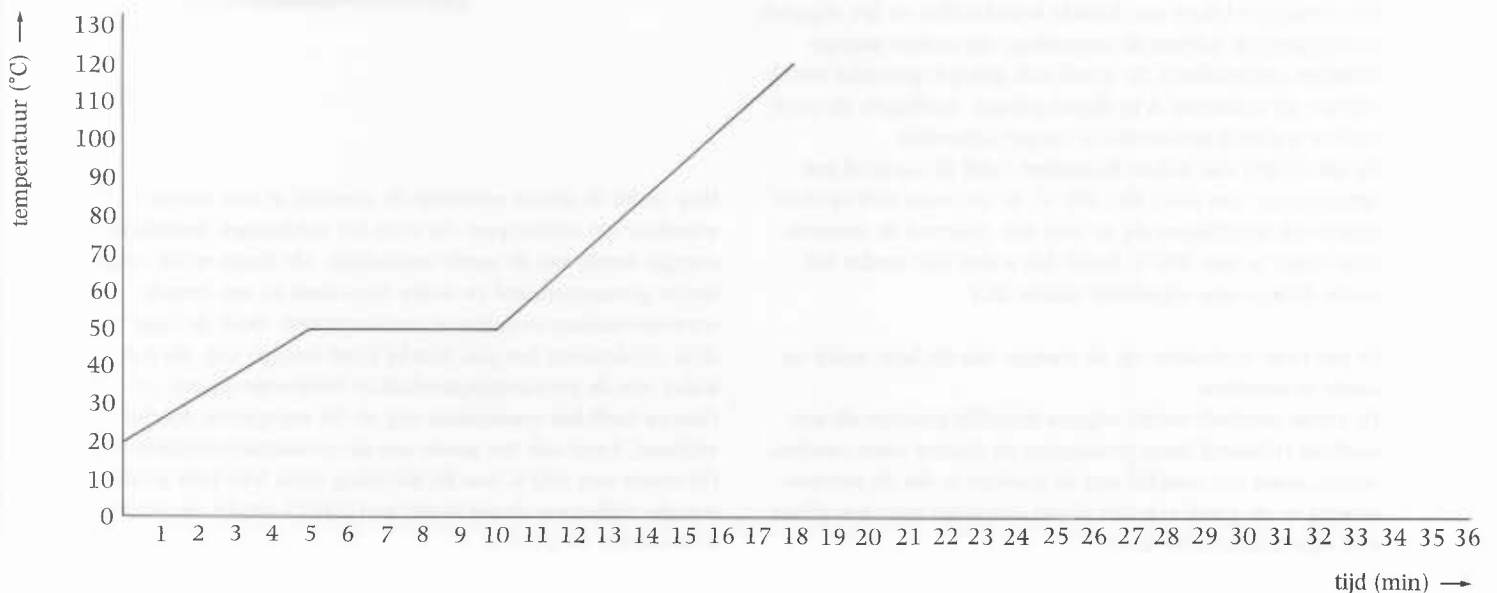
b Neem de figuur over en schets daarin het temperatuurverloop voor de periode van $t = 18$ minuten tot $t = 24$ minuten.

In plaats van 1600 g verwarmt Judith nu 800 g van die vaste stof met het kookplaatje van 300 W.

c Teken in hetzelfde diagram de grafiek als de massa van 800 g wordt verwarmd van 20°C tot 120°C .

fig. 21

Temperatuur-tijdgrafiek van het verwarmen van een vaste stof.



T4 De koelkast en aardwarmte

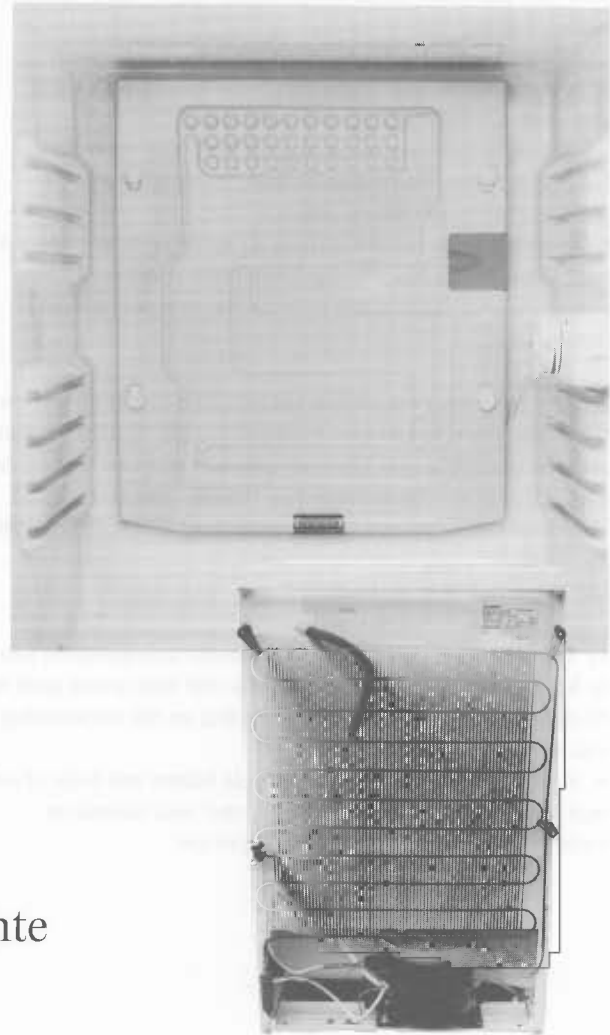
Warmte verplaatst zich *uit zichzelf* alleen van een plaats met een hoge temperatuur naar een plaats met een lage temperatuur. Maar in een koelkast wordt energie getransporteerd van een plaats met een lage temperatuur naar een plaats met een hoge temperatuur. Hierbij wordt gebruik gemaakt van het principe dat voor het verdampen van een vloeistof energie nodig is. Deze energie wordt onttrokken aan de omgeving, in dit geval: de ruimte in de koelkast.

In een koelkast treffen we een compressor, een verdamper en een condensor aan, die zijn verbonden door een buizenstelsel (figuur 22).

In de verdamper gaat vloeistof over in de gasvormige fase. De verdamper zit in de koelkast. De voor het verdampen benodigde energie wordt onttrokken aan de ruimte in de koelkast, waardoor de temperatuur in de koelkast daalt. De compressor (een apparaat waarin damp of gas wordt samengeperst) pompt de damp naar de condensor. De condensor zit aan de achterkant buiten de koelkast en bestaat uit een lange dunne buis, die in lussen is omgebogen. De lussen zijn onderling verbonden door lamellen, met als doel: vergroting van het oppervlak. De functie van de condensor is vergelijkbaar met die van een radiator van de centrale verwarming: overdracht van warmte-energie aan de omgeving.

In de condensor condenseert de damp. Hierbij komt energie vrij. De condensor staat deze energie aan de lucht in de keuken af. Zo wordt de warmte *in* de koelkast dus verplaatst naar de omgeving van de kast. In de koelkast daalt de temperatuur, buiten de kast wordt het warmer.

fig. 22
Een koelkast.



Toepassing van aardwarmte

Het dreigende tekort aan fossiele brandstoffen en het stijgende energiegebruik hebben de toepassing van andere energiebronnen gestimuleerd. Zo wordt ook gebruik gemaakt van de energie die aanwezig is in dieper gelegen aardlagen: de *aardwarmte* (meestal *geothermische energie* genoemd).

Op een diepte van enkele kilometers heeft de aarde al een temperatuur van meer dan 100 °C. Er bevinden zich op deze diepte ook waterlagen die zo heet zijn. (Hoewel de temperatuur hoger is dan 100 °C, kookt het water niet omdat het onder druk in een afgesloten ruimte zit.)

Er zijn twee methoden om de energie van dit hete water op aarde te benutten.

De eerste methode werkt volgens hetzelfde principe als een koelkast (vloeistof laten verdampen en daarna laten condenseren), maar het verschil met de koelkast is dat de warmte-energie in dit geval van een plaats met hoge naar een plaats met lage temperatuur gaat.

Diep onder de grond verdampst de vloeistof in een warmte-wisselaar (de verdamper). De voor het verdampen benodigde energie wordt aan de aarde onttrokken. De damp wordt naar boven getransporteerd en onder hoge druk in een tweede warmte-wisselaar (condensor) samengeperst. Door de hoge druk condenseert het gas. Hierbij komt energie vrij, die het water van de verwarmingsinstallatie verwarmt (figuur 23). Daarna koelt het condensaat nog af. De energie die daarbij vrijkomt, komt ook ten goede aan de verwarmingsinstallatie. Uit stoom van 100 °C kan bij afkoeling circa 540 keer zoveel energie vrijkomen als uit water van 100 °C, omdat de condensatiewarmte zo groot is.

In de warmtewisselaar wordt de energie van stoom en warm water uit de aardbodem overgedragen aan een koude vloeistof. Dit gebeurt zonder dat de vloeistoffen met elkaar in contact komen: de koude vloeistof stroomt door buizen waar de stoom en het hete water omheen stromen.

Soms wordt in de ondergrondse verdamper stoom van hoge druk geproduceerd die bovengronds wordt gebruikt om een turbine aan te drijven. De turbine wekt elektrische energie op.

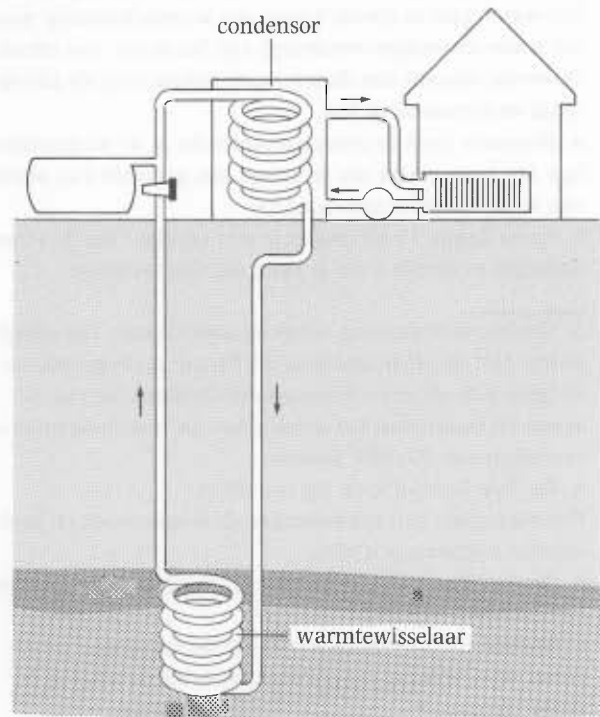
Bij de tweede methode wordt het hete water uit de bodem rechtstreeks omhoog gepompt. In een warmtewisselaar kan de aanwezige energie worden overgedragen op een verwarmingssysteem, zoals stadsverwarming.

Het opgepompte water moet teruggepompt worden in de aarde, omdat er erg veel zouten in opgelost zijn. Deze zouten zouden het milieu sterk vervuilen als het water in het riool of in de rivieren terechtkomt.

De eerste methode (water ondergronds verdampen; bovengronds condenseren en afkoelen) is wel duurder maar veel effectiever dan de tweede methode (water oppompen en bovengronds afkoelen). Bij de eerste methode wordt de energie benut die vrijkomt als de waterdamp condenseert, en de energie die vrijkomt als het water verder afkoelt. De zeer

fig. 23

Het gebruik van aardwarmte om huizen te verwarmen.



grote condensatiewarmte van water (2260 kJ/kg) en de soortelijke warmte (4,18 kJ/kg) spelen dus een rol. Bij de tweede methode speelt alleen de betrekkelijk kleine soortelijke warmte een rol. Alleen de energie die vrijkomt als het water afkoelt, wordt benut.

Blok 22

W4

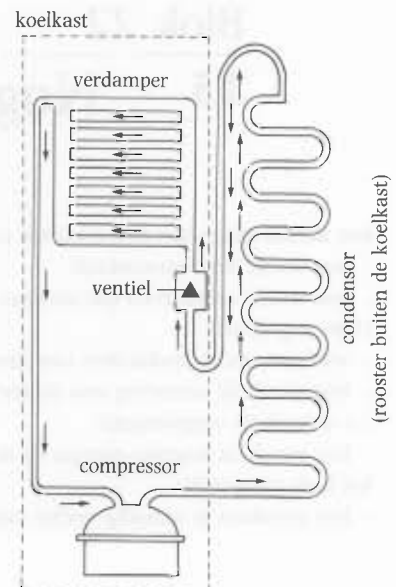
1 In figuur 24 zie je een schematische tekening van een koelkast.

In de verdamper gaat vloeibaar gas over in de gasvormige fase. De compressor pompt de damp naar de condensor. Daar condenseert de damp weer.

- In welk onderdeel van de koelkast is energie nodig? Waar komt deze energie vandaan?
- In welk onderdeel van de koelkast komt energie vrij? Waar blijft deze energie?
- Welke kleur heeft de condensor? Waarom?
- Waarom is het oppervlak van de condensor met lamellen vergroot?
- Waarom zijn de meeste koel- en vrieskasten wit?
- Waarom zit het koelement boven in de koelkast?

fig. 24

Een schematische tekening van een koelkast.



2 Men kan broeikassen verwarmen met behulp van aardwarmte. Water met een lage temperatuur wordt diep de grond in gepompt waar de aarde het verwarmt (figuur 25). Het water gaat in circuit 1 naar een warmtewisselaar waar het water de energie overdraagt aan het water van circuit 2. Dit water stroomt van de warmtewisselaar naar de kas en terug en verwarmt de kas.

a Wanneer vindt de energie-overdracht in de warmtewisselaar het beste plaats: als de buizen zijn gemaakt van plastic of van koper? Licht je antwoord toe.

b Neem figuur 25 schematisch over en kleur het deel van de leidingen in circuit 2 dat je het beste moet isoleren.

3 Een stadsverwarming werkt op aardwarmte. Het energiebedrijf past de eerste methode uit T4 toe: ondergronds verdampen van water en bovengronds condenseren van de stoom en koelen van het condensaat. De installatie moet een vermogen van 5,0 MW leveren.

a Bereken hoeveel joule per uur dit is.

Het rendement van het bovengronds condenseren en koelen van het condensaat is 90%.

b Bereken hoeveel joule per uur de stoom bovengronds moet aanleveren.

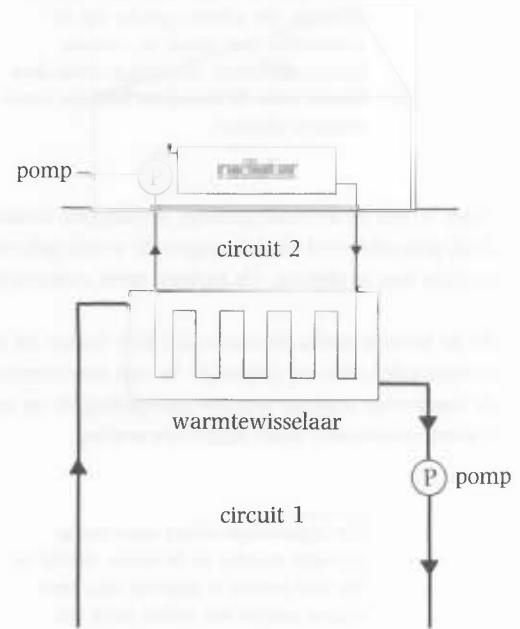
c Bereken nu hoeveel kg stoom per uur minimaal uit de grond moet worden aangeleverd. (Gebruik de tabel in figuur 1.)

4 Het koelsysteem van een koelkast bevat 200 g samengeperst gas. De verdampingswarmte van dit gas is 60 kJ/kg. Als de juiste koeltemperatuur in de koelkast is bereikt, blijkt dat per uur 15 kJ aan warmte-energie naar binnen 'lekt'.

a Hoeveel kg vloeibaar gas moet per uur worden verdampt om de juiste temperatuur in de koelkast te handhaven?

b Hoeveel keer moet daarvoor per uur de totale inhoud van het systeem worden verdampt?

fig. 25
Verwarming van een broeikas met aardwarmte.



Om de damp samen te persen tot hij condenseert, moet de compressor een arbeid leveren van 648 kJ/kg.

c Hoeveel nuttige arbeid moet de compressor per uur leveren om de damp die is ontstaan weer vloeibaar te maken? De compressor heeft een rendement van 90%.

d Hoeveel energie moet de compressor per uur aan het elektrische net onttrekken?

e Bereken hoeveel kWh energie dit is ($1 \text{ kWh} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ J}$).

f Hoe groot is dus het (gemiddeld) vermogen in watt dat deze koelkast gebruikt?

Blok 22

T5 Nogmaals de c.v.-installatie

Een aantal zaken bleven tot nu toe nog onbesproken, zoals:

- hoe werkt een thermostaat?
- hoe wordt voorkomen dat aardgas ontsnapt als de waakvlam is gedoofd?
- waarom zijn de radiatoren van ijzer?
- hoe wordt de uitzetting van de verwarmingsbuizen in de c.v.-installatie opgevangen?
- hoe wordt de warmte-energie op de gewenste wijze over het huis verspreid?
- hoe voorkom je onnodig verlies van warmte-energie?

De *thermostaat* – al genoemd in T1 – regelt de gevraagde kamertemperatuur; de werking berust op de eigenschap van een strookje bimetaal.

Bimetalen worden ook toegepast in schakelaars die reageren op temperatuurverandering. Voorbeelden zijn:

- Een *thermometer van bimetaal*. Een lange strip bimetaal wordt tot een spiraal opgerold (figuur 26). Het binnenste uiteinde wordt vastgemaakt, het buitenste uiteinde wordt omgebogen tot een wijzer. Als de temperatuur verandert, ontrolt de spiraal zich enigszins of rolt zich verder in elkaar; daardoor verplaatst de wijzer zich langs een schaalverdeling.

Om te kunnen meten moet het instrument met een vloeistof-thermometer worden geijkt.

- Een *bimetaalzekering*. In de zekering loopt de stroom door het bimetaal (figuur 27). Als de stroomsterkte toeneemt, wordt het bimetaal warm en trekt het steeds verder krom. Als de maximale stroomsterkte wordt overschreden, schiet de vergrendeling open en schakelt de zekering de stroom uit. Het bimetaal koelt daarna weer af, maar zolang de vergrendeling niet wordt hersteld, kan er geen stroom lopen.

- Een *verwarmingsthermostaat*. In de thermostaat zit een opgerolde strip bimetaal die – afhankelijk van de temperatuur in de kamer – meer of minder krom trekt (figuur 28).

Aan het uiteinde van de bimetaalspiraal zit een kwikschakelaar. Deze zorgt voor het in- en uitschakelen van de c.v.-installatie.

De kwikschakelaar bestaat uit een glazen buisje, waarin een druppel kwik zit. In horizontale stand sluit de kwikdruppel de uiteinden van twee stroomdraden. De stroom die nu loopt houdt – via een elektromagneet – de gasklep naar de brander open, zodat deze blijft branden.

Als de gewenste kamertemperatuur is bereikt, kantelt de kromgetrokken bimetaalspiraal het buisje zó ver dat de kwikdruppel naar rechts rolt. De elektromagneet wordt nu uitgeschakeld, zodat de duwveer de gasklep sluit, waardoor de brander dooft.

Als de kamer door uitstraling te veel warmte-energie heeft verloren, is de bimetaalspiraal minder krom geworden. Daardoor kantelt het glazen buisje weer terug naar de horizontale stand. De kwikdruppel sluit opnieuw de contacten naar de elektromagneet, de gasklep wordt weer geopend en de brander wordt weer door de waakvlam ontstoken.

De verwarmingsthermostaat verzorgt op deze manier de temperatuurregeling in de kamer waar hij hangt. In T1 werd al besproken dat de thermostaat niet op de tocht mag hangen. Zijn temperatuur is dan immers geen maat voor de temperatuur in de hele kamer.

fig. 26

Een bimetaal-thermometer.



fig. 27

Een bimetaalzekering.

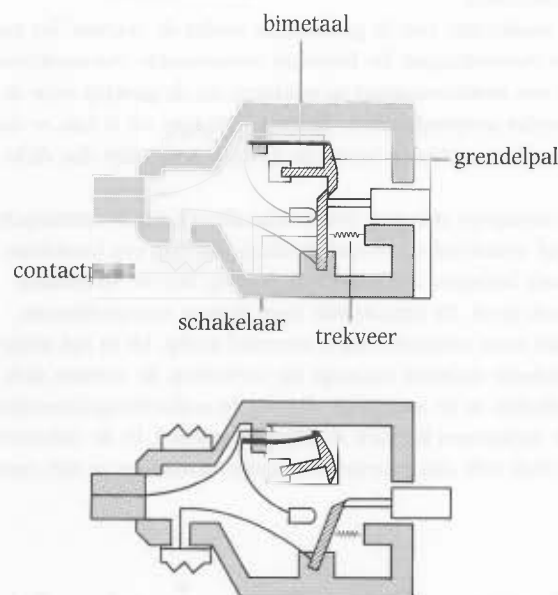
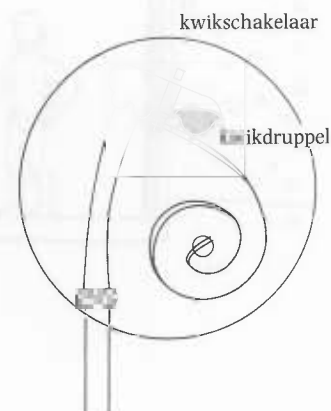
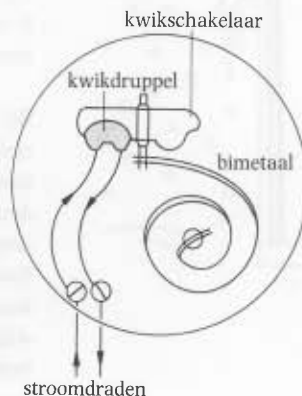


fig. 28

Een thermostaat met kwikschakelaar.



In een c.v.-installatie vinden we ook een *waakvlambeveiliging* (figuur 29).

Als de waakvlam – door welke oorzaak dan ook – is gedoofd, moet de gastoevoer altijd gesloten blijven. Het onverbrande gas zou zich anders in de ketel ophopen en kunnen ontploffen.

In de *waakvlambeveiliging* zorgt een *thermokoppel* voor een stroompje, waardoor de gasklep van de brander door een elektromagneet wordt opgehouden (figuur 29).

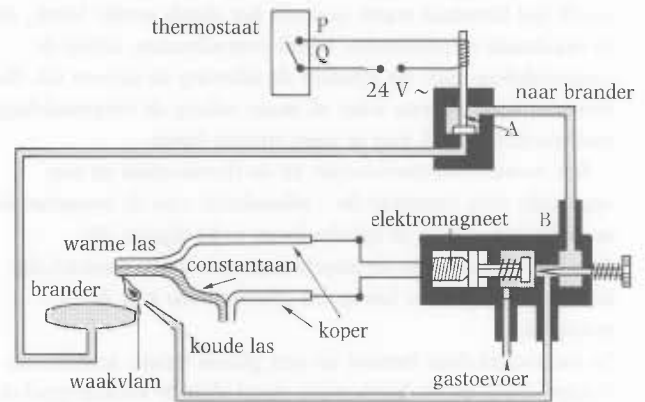
Een thermokoppel bestaat uit draden van twee verschillende soorten metaal, gescheiden door twee lassen. Als daartussen een temperatuurverschil heerst, ontstaat er een spanningsverschil: de thermospanning. Als het temperatuurverschil tussen de lassen toeneemt, wordt die thermospanning groter, en dus ook de thermostroom die door de spanning wordt veroorzaakt.

De waakvlam van de gasbrander verhit de 'warme' las van een thermokoppel. De hierdoor veroorzaakte thermostroom zet een elektromagneet in werking, die de gasklep vóór de brander geopend houdt. Als de waakvlam uit is kan er dus geen thermostroom lopen, de gasklep is en blijft dus dicht.

De *radiatoren* zijn van ijzer omdat dit een goed warmtegeleidend materiaal is, relatief goedkoop en niet erg kwetsbaar. Goede laklagen kunnen roestvorming aan de buitenkant voorkomen. De binnenkant geeft weinig roestproblemen, want voor roestvorming is zuurstof nodig. De in het water opgeloste zuurstof ontsnapt bij verhitting. Er vormen zich dan gasbellen in de installatie, die via de ontluchtingskraantjes op alle radiatoren kunnen worden verwijderd. In de radiatoren bevindt zich dus zuurstofarm water, waardoor ze niet roesten.



fig. 29
De waakvlambeveiliging van een c.v.-ketel.



Om dezelfde reden als bij de c.v.-ketel vinden we ook bij de geiser een waakvlam met beveiliging. Moderne c.v.-ketels en geisers zijn voorzien van een *elektronische* ontsteking en beveiliging. Daardoor wordt ook bezuinigd op het gasverbruik.

Niet op alle plaatsen van een woning zal dezelfde temperatuur vereist zijn: in de zitkamer, studeerkamer en badkamer/douche is een hogere temperatuur vereist dan in een slaapkamer, garage of keuken.

Welke temperatuur in een vertrek kan worden verkregen, hangt af van de grootte van de radiatoren en van het aantal parallelle platen in de radiatoren, dus van de totale oppervlakte. Maar als de radiatoren meer parallelle platen hebben, moet het c.v.-systeem meer water bevatten. De ketel moet natuurlijk een zó grote capaciteit hebben, dat hij aan de warmtevraag in alle vertrekken kan voldoen.

In T3 werd de HR-ketel al besproken en de juiste keuze van de ketelwatertemperatuur.

Waarom radiatoren zelden zwart worden geschilderd, werd in T2 besproken. Ook werd daar gezegd wat de functie van de U-vormige verbindingstukken tussen de platen van radiatoren is.

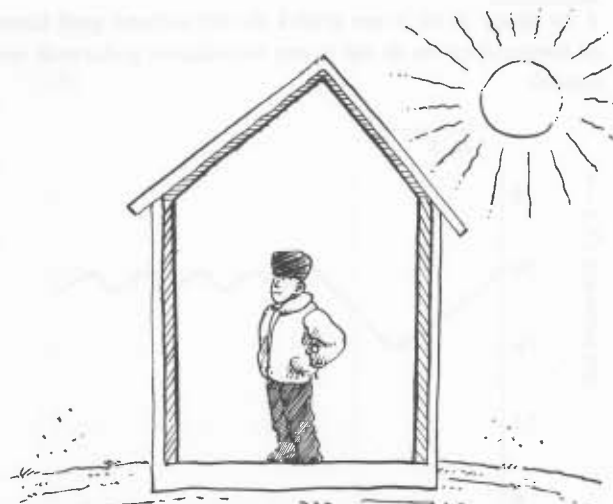
Bij het opwarmen en afkoelen van een c.v.-installatie treedt natuurlijk *uitzetting en inkrimping van het buizenstelsel* op. Dit kan zonder problemen als de buizen op de plaatsen, waar zij door muren of plafonds gaan, met een loden manchets zijn omgeven. Binnen deze manchets kan de buis verschuiven. Radiatoren worden altijd onder ramen geplaatst, omdat dit de koudste plaatsen van het vertrek zijn. Ramen waar de opstijgende warme lucht langs strijkt, zullen bovendien niet beslaan door condenserende waterdamp. Bedenk dat wij waterdamp uitademen, die op de koudste plaats kan condenseren!

Het glasoppervlak moet liefst zo klein mogelijk zijn om verlies van warmte-energie tegen te gaan. Dit is natuurlijk in strijd met onze behoefte aan zoveel mogelijk daglicht. Daarom worden de laatste jaren steeds meer *dubbele ruiten* toegepast. Dubbele ruiten bestaan uit twee lagen spiegelglas, waartussen zich een laagje droog stikstofgas bevindt. Gas is een slechte geleider, zodat het verlies van warmte-energie naar buiten hierdoor aanzienlijk wordt beperkt. Het opgesloten gas moet droog zijn om condensatie binnen de glasruiten te voorkomen. Vandaar dat zogenaamde 'voorzetramen' veel slechter zijn: deze zijn niet gasdicht, en er kan dus wel condensatie optreden.

Het verlies van warmte-energie tijdens het transport van heet water naar de radiatoren wordt zoveel mogelijk beperkt. Waar de leidingen door ruimten lopen die niet verwarmd hoeven te worden, moeten die leidingen worden bekleed met isolerend materiaal.

Goede *isolatie* van muren en daken en het aanbrengen van tochtstrip is natuurlijk ook van groot belang om energieverlies te voorkomen.

Moderne huizen hebben altijd een buiten- en binnenmuur, waar tussen zich een minstens 2 cm dikke luchtlaag bevindt. Men spreekt van de 'spouw' (luchtlaag) en van 'spouw-muren'. Deze luchtlaag werkt niet alleen isolerend, maar voorkomt bij regen ook dat de binnenmuur vochtig wordt. Poreuze baksteen kan namelijk veel vocht opzuigen. Soms spuit men de spouw vol met kleine bolletjes kunststof (tempex); dit is namelijk een betere isolator dan lucht. Deze methode kan op bestaande huizen worden toegepast. Ook wordt de spouw tijdens de bouw vaak gevuld met glaswoldekens. Vooral bij de muren onder vensters is dit belangrijk, omdat daar de radiatoren staan.



Als aanvulling op deze isolatie plakt men vaak *radiatorfolie* tegen de muur achter de radiatoren. Dit folie bestaat uit een isolerende glaswoldeken, waar aan één kant een glimmende laag aluminiumfolie op zit. Hoe je dit folie het beste kunt monteren (met de glimmende laag naar de radiator of naar de buitenmuur) kun je zelf uitzoeken in de extrastof EI.

Al deze maatregelen kosten veel geld, maar de beste energiebesparing is nog altijd *energie-bezuiniging*. Als je in huis een trui aantrekt kun je je bij een temperatuur van 19 °C óók heel behaaglijk voelen. Verder werd in T2 al opgemerkt dat je veel gas bespaart door de thermostaat een half uur voor je naar bed gaat op de 'nachttemperatuur' te zetten.

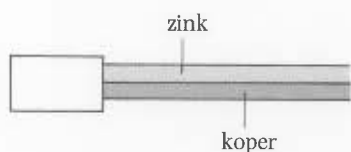
Blok 22

W5

1a Leg uit dat een bimetaal zowel bij temperatuurverhoging als temperatuurverlaging krom trekt.

fig. 30

Een bimetaal van zink en koper.



Het in figuur 30 getekende bimetaal is opgebouwd uit twee metalen: koper (uitzettingscoëfficiënt: $16,8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) en zink (uitzettingscoëfficiënt: $29,7 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$).

b Leg uit in welke richting het metaal krom trekt als de temperatuur stijgt.

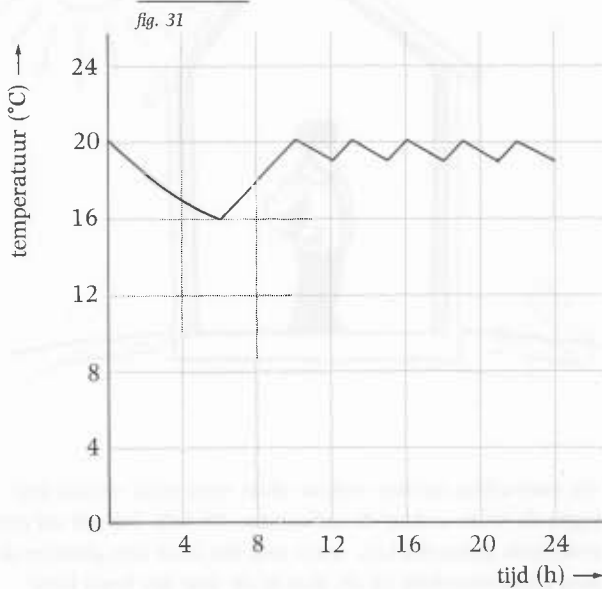
2 In een thermostaat zit een spiraalvormig opgerolde strip bimetaal, die uitrolt als de temperatuur stijgt.

Zit het metaal met de grootste uitzettingscoëfficiënt aan de binnen- of buitenkant van de spiraal? Verklaar je antwoord.

3 De ketelthermostaat van een c.v.-installatie zorgt ervoor dat:

- A de ketel altijd automatisch een gunstig rendement heeft.
- B het ketelwater niet te heet wordt.
- C het behaaglijk wordt in de woonkamer.
- D het water in de ketel niet bevroert als de bewoners lang niet thuis zijn.

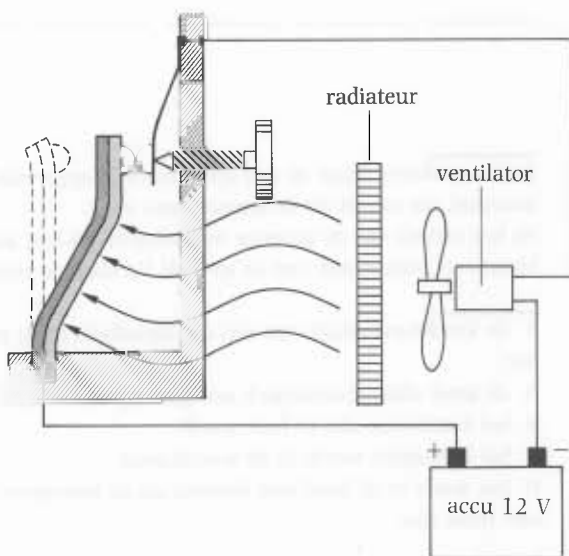
4 In figuur 31 zie je een grafiek die het verband geeft tussen de temperatuur en de tijd in een woonkamer gedurende één etmaal.



- Verklaar de vorm van de grafiek tussen 0 en 7 uur.
- Op welk tijdstip werd de verwarming uitgeschakeld en op welk tijdstip weer ingeschakeld?
- Verklaar de vorm van de grafiek tussen 7 en 10 uur.
- Verklaar de vorm van de grafiek tussen 10 en 24 uur.

5 In auto's wordt voor de koeling van het koelwater in de radiator vaak een 'zelfdenkende ventilator' gebruikt (figuur 32). Beschrijf de werking van zo'n ventilator.

fig. 32
Een zelfdenkende ventilator.



6 Peter moet voor een proef een ruimte van 1 m^3 op een temperatuur van $35 \pm 1^\circ\text{C}$ houden. Hij gebruikt een föhn (220 V), die via een relais (12 V) door een kamerthermostaat wordt in- en uitgeschakeld (figuur 33). De stroomdraden, die door de kwikschakelaar in de thermostaat kunnen worden doorverbonden, gaan naar het 12 V-relais, dat de 220 V-voeding voor de föhn in- en uitschakelt.

De kamerthermostaat is zo ingesteld, dat de föhn wordt ingeschakeld als de temperatuur bij de thermostaat is gedaald tot 34°C . De föhn wordt weer uitgeschakeld als de temperatuur bij de thermostaat tot 36°C gestegen is.

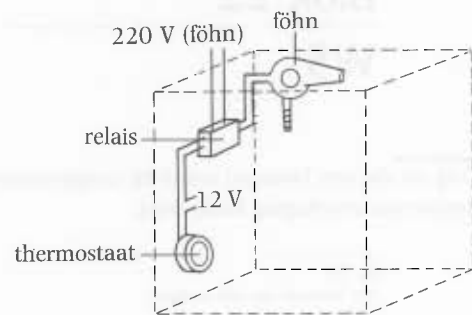
a In figuur 33 zie je dat de thermostaat onderin en de föhn bovenin de ruimte zijn gemonteerd.

Is dit de beste methode om de hele ruimte op 35°C te houden, of kan Peter de föhn en de thermostaat beter van plaats verwisselen? Licht je antwoord toe.

b Neem de volgende tekst over en vul de juiste keuzewoorden in.

Als de temperatuur stijgt, rolt de bimetaalspiraal zich verder uit/meer op. Als de temperatuur bij de thermostaat 36°C is geworden, kantelt de kwikschakelaar en rolt de druppel naar rechts/links, zodat de stroomkring wordt gesloten/verbroken. Er loopt nu wel/geen stroom door het relais, zodat de 220 V-voeding voor de föhn is in/uitgeschakeld. De temperatuur stijgt/daalt, waardoor de bimetaalspiraal meer uitrolt/inrolt. Als de temperatuur bij de thermostaat 34°C wordt, kantelt de kwikschakelaar opnieuw. Daardoor rolt de kwikdruppel naar rechts/links, waardoor de stroomkring van het relais wordt geopend/gesloten. De föhn wordt nu ingeschakeld/uitgeschakeld, zodat de temperatuur in de ruimte daalt/stijgt.

fig. 33
Opstelling om een föhn met een thermostaat en een relais in en uit te schakelen.



Soortelijke warmte en warmtecapaciteit

De *warmtecapaciteit* van een voorwerp is de warmte die nodig is om het voorwerp 1°C (of 1 K) in temperatuur te doen stijgen.

Om beter te begrijpen wat de warmtecapaciteit van een voorwerp is, maken we een vergelijking.

Stel: je hebt twee bekers; beker A is smal, beker B is breed.

Giet je nu in beide bekers evenveel water, dan stijgt het water in beker A hoger dan in beker B.

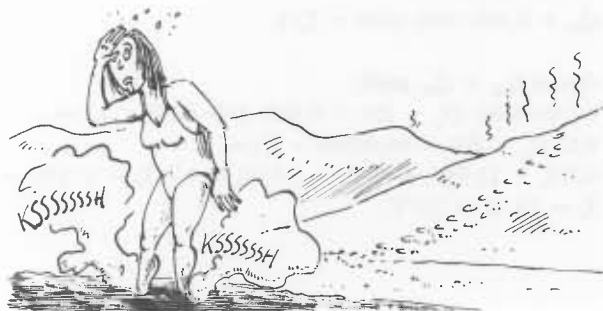
We kunnen nu het waterpeil in de bekers vergelijken met de temperaturen van twee voorwerpen. De breedte van de bekers vergelijken we met de warmtecapaciteit.

Stel: je hebt twee voorwerpen C en D. Voorwerp C heeft een kleine warmtecapaciteit; voorwerp D heeft een grotere warmtecapaciteit. Je voert nu aan beide voorwerpen evenveel energie toe. Het voorwerp met de kleinste warmtecapaciteit (te vergelijken met de smalle beker) zal nu een hogere eindtemperatuur krijgen dan het voorwerp met de grotere warmtecapaciteit (te vergelijken met de brede beker).

De *soortelijke warmte* van een stof is de hoeveelheid warmte die nodig is om 1 kg van die stof 1°C in temperatuur te doen stijgen.

De soortelijke warmte is dus een eigenschap van *stoffen*, terwijl de warmtecapaciteit een eigenschap is van *voorwerpen*. De betekenis van de soortelijke warmte blijkt uit het volgende.

De stof water heeft per kg veel meer energie nodig om 1°C in temperatuur te stijgen dan de stof zand. Ofwel: water heeft een grotere soortelijke warmte dan zand. Dit kun je zelf vaststellen als je na een aantal mooie zomerdagen op je blote voeten een strandwandeling maakt. Het mulle zand langs de duinrand blijkt dan gloeiend heet te zijn, terwijl het natte zand langs de waterlijn lekker koel is. Toch hebben het vochtige en het mulle zand per m^2 evenveel stralingsenergie van de zon ontvangen! Maar omdat het vochtige zand (vanwege de grote soortelijke warmte van het water) veel méér energie nodig heeft om 1°C in temperatuur te stijgen dan het kurkdroge zand, is het natte zand veel minder warm geworden.



Eenheden en symbolen

Het symbool voor soortelijke warmte is c .

De eenheid van soortelijke warmte is $\text{J/kg} \cdot \text{K}$.

Het symbool voor warmtecapaciteit is C .

De eenheid van warmtecapaciteit is J/K .

Formules

Het verband tussen energie, soortelijke warmte, massa en temperatuurverandering is in formulevorm:

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

Daarin is

- Q de energie in J (die de stof opneemt of afstaat als de temperatuur verandert);

- c de soortelijke warmte in $\text{J/kg} \cdot \text{K}$;

- m de massa in kg ;

- ΔT de temperatuurverandering in K of $^\circ\text{C}$.

Het verband tussen energie, warmtecapaciteit en temperatuurverandering is in formulevorm:

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

Daarin is

- Q de hoeveelheid energie in J (die het voorwerp opneemt of afstaat als de temperatuur verandert);

- C de warmtecapaciteit in J/K ;

- ΔT de temperatuurverandering in K of $^\circ\text{C}$.

Voorbeeld 1

Een warmtemeter met toebehoren heeft een warmtecapaciteit van 85 J/K .

Hoeveel energie is nodig om de warmtemeter 25°C in temperatuur te doen stijgen?

Oplossing:

Uit de gegevens blijkt: $C = 85\text{ J/K}$ en $\Delta T = 25^\circ\text{C}$.gevraagd wordt Q .

$$Q = C \cdot \Delta T \Rightarrow Q = 85 \cdot 25 = 2125\text{ J} = 2,1\text{ kJ}.$$

Voorbeeld 2

Hoeveel energie is nodig om 30 g lood 35°C in temperatuur te doen stijgen?

Oplossing:

Uit de gegevens blijkt: $m = 0,030\text{ kg}$ en $\Delta T = 35^\circ\text{C}$; uit de tabel in figuur 1 blijkt: $c_{\text{lood}} = 0,13\text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C} = 130\text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$.gevraagd wordt Q .

$$Q = c \cdot m \cdot \Delta T \Rightarrow Q = 0,030 \cdot 130 \cdot 35 = 136,5\text{ J} \approx 137\text{ J}.$$

Opgaven over soortelijke warmte en warmtecapaciteit

Gebruik zonodig bij alle opgaven de tabel in figuur 1.

1 De warmtecapaciteit van een warmtemeter is 200 J/K.

a Hoeveel energie is nodig om de warmtemeter 5 K te verwarmen?

b Hoeveel energie is nodig om de warmtemeter 80 K te verwarmen?

2 De soortelijke warmte van koper is 387 J/kg · K.

a Hoeveel energie is nodig om 5 g koper 1 K te verwarmen?

b Hoeveel energie is nodig om 120 g koper 15 K te verwarmen?

3 Een hoeveelheid zilver van 100 g wordt verwarmd van 20 °C tot 600 °C. Bereken de hoeveelheid energie die daarvoor nodig is.

4 Een metalen pan heeft een warmtecapaciteit van 300 J/K. Bereken hoeveel energie vrijkomt als de pan afkoelt van 100 °C tot 20 °C.

5 De soortelijke warmte van een stof is 10 kJ/kg · K. Bereken de temperatuurstijging als je 6,0 kJ energie aan 50 g van die stof toevoert.

6 Een warmtemeter heeft een warmtecapaciteit van 300 J/K. De meter bevat 100 gram olie. De soortelijke warmte van de olie is 1,7 kJ/kg · K. Bereken hoeveel energie nodig is om de warmtemeter met olie 50 K te verwarmen.

Als warmteuitwisseling plaatsvindt tussen twee hoeveelheden stof van verschillende temperatuur, moeten ze de energie die er is 'eerlijk delen'. Dat houdt dus in dat de hoeveelheid energie die de stof met de hoogste temperatuur afstaat, gelijk moet zijn aan de hoeveelheid energie die de stof met de laagste temperatuur opneemt.

In formule: $Q_{op} = Q_{af}$.

Hierbij nemen we aan dat we over een proces binnen een 'gesloten systeem' praten. Dat wil zeggen dat die hoeveelheden stof alleen met elkaar energie kunnen uitwisselen. Ze mogen dus geen energie aan hun omgeving afstaan of daaruit opnemen. Een goede warmtemeter kun je beschouwen als zo'n gesloten systeem.

Eigenlijk is de bovenstaande formule dus een toepassing van de 'wet van behoud van energie': er kan geen energie 'verloren' gaan.

Voorbeeld 3

Een bekersglas bevat 150 gram water van 20 °C. In een blikje zit 100 gram ijzerkorrels. Het blikje heeft een kwartier in een pan met kokend water gestaan.

De inhoud van het blikje wordt snel in het bekersglas met water omgekeerd, waarna met een thermometer wordt geroerd om de eindtemperatuur te bepalen. (De eindtemperatuur is hier de hoogste temperatuur die wordt gemeten.)

We nemen aan dat:

- de warmtecapaciteit van het bekersglas is te verwaarlozen;
- het bekersglas geen warmte-energie uitwisselt met de omgeving.

De warmte die bij het afkoelen van het ijzer vrijkomt, verwarmt het water. Gevraagd wordt de eindtemperatuur (T_e) van water en ijzerkorrels.

Oplossing:

Volgens de wet van behoud van energie kan er geen warmte verdwijnen. Dus: de warmte die het ijzer afgeeft, wordt door het water opgenomen.

We gebruiken de formule

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

Hierin is:

Q de opgenomen of afgestane warmte in J;

c de soortelijke warmte in J/kg · K;

m de massa in kg;

ΔT het temperatuurverschil in K of °C.

Uit de gegevens blijkt voor het water:

$m = 150 \text{ g} = 0,150 \text{ kg}$. Uit de tabel in figuur 1 blijkt:

$$c_{\text{water}} = 4,18 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K} = 4180 \text{ J/kg} \cdot \text{K}.$$

De begintemperatuur T_b van het water is 20 °C; de eindtemperatuur T_e zal hoger zijn, dus de temperatuurstijging van het water wordt $(T_e - 20)^\circ\text{C}$.

De formule wordt:

$$Q_{op} = 0,150 \cdot 4180 \cdot (T_e - 20) \text{ J}.$$

Voor het ijzer geldt: $m = 100 \text{ g} = 0,100 \text{ kg}$.

Uit de tabel in figuur 1 blijkt: $c_{\text{ijzer}} = 0,46 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K} = 460 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$.

De begintemperatuur T_b van het ijzer was 100 °C (want het blikje met ijzer stond lang in het kokende water). De temperatuur van het ijzer daalt tot de eindtemperatuur T_e . De eindtemperatuur is lager dan de begintemperatuur, dus de temperatuurdaling van het ijzer wordt $(100 - T_e)^\circ\text{C}$.

De formule wordt:

$$Q_{af} = 0,100 \cdot 460 \cdot (100 - T_e) \text{ J}.$$

Omdat $Q_{op} = Q_{af}$, geldt:

$$0,150 \cdot 4180 \cdot (T_e - 20) = 0,100 \cdot 460 \cdot (100 - T_e) \Rightarrow$$

$$627 (T_e - 20) = 46,0 (100 - T_e) \Rightarrow$$

$$627T_e - 12540 = 4600 - 46,0T_e \Rightarrow 673T_e = 17140 \Rightarrow$$

$$T_e = 25,47 = 25^\circ\text{C}.$$

Voorbeeld 4

Een warmtemeter met een warmtecapaciteit van $80 \text{ J/}^\circ\text{C}$ bevat 250 gram alcohol van 18°C . Men voegt hieraan toe: 200 gram koperkrullen van 90°C . Bereken de eindtemperatuur.

Oplossing:

De warmte-energie die de warmtemeter en de alcohol opnemen, is gelijk aan de warmte-energie die het koper afstaat. De formule voor de energie die warmtemeter en alcohol opnemen, wordt:

$$Q_{\text{op}} = C(T_e - 18) + m \cdot c \cdot (T_e - 18) \text{ J.}$$

Volgens de gegevens is $C = 80 \text{ J/}^\circ\text{C}$; $m = 250 \text{ g} = 0,250 \text{ kg}$.

Volgens de tabel is de soortelijke warmte (c) van alcohol $2,43 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K} = 2430 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$.

Dus:

$$Q_{\text{op}} = 80 \cdot (T_e - 18) + 0,250 \cdot 2430 \cdot (T_e - 18).$$

Omdat in beide termen de factor $(T_e - 18)$ voorkomt, kunnen we de formule schrijven als:

$$Q_{\text{op}} = (80 + 607,5) \cdot (T_e - 18) = 687,5(T_e - 18) \text{ J.}$$

De formule voor de energie die het koper afstaat wordt:

$$Q_{\text{af}} = m \cdot c \cdot (90 - T_e) \text{ J} \quad (\text{want } T_e \text{ is lager dan } 90^\circ\text{C}).$$

Hierin is $m = 200 \text{ g} = 0,200 \text{ kg}$ en volgens de tabel is $c = 0,39 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$. Ofwel: $c = 390 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$.

Dus:

$$Q_{\text{af}} = 0,200 \cdot 390 \cdot (90 - T_e) = 78 \cdot (90 - T_e) \text{ J.}$$

Uit $Q_{\text{op}} = Q_{\text{af}}$ volgt:

$$687,5(T_e - 18) = 78(90 - T_e) \Rightarrow$$

$$687,5T_e - 12375 = 7020 - 78T_e \rightarrow 765,5T_e = 19395 \Rightarrow$$

$$T_e = 25,34 \Rightarrow T_e = 25^\circ\text{C}.$$

Je ziet: moeilijk is het eigenlijk niet; warmte-energieberekeningen houden niets anders in dan een zorgvuldig soort boekhouden.

De 'creditzijde' is Q_{op} en de 'debetzijde' is Q_{af} ; volgens de wet van behoud van energie moeten die twee aan elkaar gelijk zijn. Net zoals je uitgaven plus het geld dat je nog over hebt samen gelijk moeten zijn aan je inkomsten.

Opgaven over uitwisseling van warmte-energie

7 Hoeveel gram water van 0°C moet je toevoegen aan 300 g water van 20°C om water van 8°C te krijgen? (De warmte-uitwisseling met het vat en de omgeving mag worden verwaarloosd.)

8 Een beker met onbekende warmtecapaciteit C bevat 70 g water van 10°C . Als daaraan 48 g water van 50°C wordt toegevoegd, wordt de eindtemperatuur 25°C . Bereken de warmtecapaciteit van de beker.

9 In een warmtemeter met een warmtecapaciteit van 50 J/K bevindt zich 150 g water van $15,2^\circ\text{C}$. Hieraan wordt 300 g loodkorrels toegevoegd van 100°C .

- Bereken de eindtemperatuur in de warmtemeter.
- Bereken de temperatuurstijging in de warmtemeter. Vervolgens wordt nog eens 300 g loodkorrels van 100°C toegevoegd.
- Bereken de nieuwe eindtemperatuur.
- Bereken de temperatuurstijging in de warmtemeter en vergelijk die met de temperatuurstijging die je in vraag b hebt berekend.
- Bedenk twee redenen waarom de eerste portie loodkorrels een grotere temperatuurstijging veroorzaakte dan de tweede portie.

10 Een warmtemeter met een warmtecapaciteit van 200 J/K bevat 300 g water. De temperatuur van het geheel is 20°C . Aan de warmtemeter wordt 200 g van een onbekend metaal toegevoegd, dat een temperatuur van 120°C heeft. De eindtemperatuur blijkt 26°C te worden.

- Bereken de energie die de warmtemeter en het water samen hebben opgenomen.
- Hoeveel energie heeft het metaal afgestaan?
- Bereken de soortelijke warmte van het metaal.
- Zoek op welk metaal dit (vermoedelijk) is.

Verwarmen en fase-overgangen

In deze herhaaltstof kun je verder oefenen met opgaven. Voor- dat je daaraan begint, moet je nagaan of je de noodzakelijke begrippen voldoende kent.

1 Geef de betekenis van de onderstaande begrippen.

Smelten – stollen – verdampen – condenseren – smeltwarmte – stolwarmte – verdampingswarmte – condensatiewarmte – soortelijke warmte – warmtecapaciteit.

Controleer je antwoorden met de antwoordbladen.

Als je veel fouten hebt gemaakt is het nuttig om een en ander nog eens op te zoeken in de basisstof.

In figuur 34 vind je een overzicht van de gebruikte groot- heden, symbolen, eenheden en formules.

Deze formules en de wet van behoud van energie kun je gebruiken als je opgaven maakt. Je moet dan wel weten welke formule en welke eenheden je moet gebruiken.

Formules

De situatie waar de opgave over gaat, bepaalt welke formule je moet nemen. Je kunt drie gevallen onderscheiden:

1 er is *geen* sprake van een fase-overgang, maar alleen van een temperatuurverandering.

Je maakt dan gebruik van

$$Q = c \cdot m \cdot \Delta T \text{ en/of}$$

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

- Gaat het over een *stof* die wordt verwarmd (of afkoelt), dan gebruik je meestal

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

- Gaat het om een *voorwerp* dat wordt verwarmd (of afkoelt), dan gebruik je

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

fig. 34

grootheid	symbool	eenheid	formule
soortelijke warmte	c	J/kg · K	$Q = c \cdot m \cdot \Delta T$
smeltwarmte	smw	J/kg	$Q = smw \cdot m$
verdampingswarmte	vw	J/kg	$Q = vw \cdot m$
warmtecapaciteit	C	J/K	$Q = C \cdot \Delta T$

2 Er is *alléén* sprake van een fase-overgang.

In dit geval gebruik je

$$Q = smw \cdot m \text{ of } Q = vw \cdot m$$

Je gaat eerst na over welke fase-overgang het gaat, ver- volgens kies je de bijbehorende formule.

3 Er is sprake van een fase-overgang *én* van temperatuur- verandering van de stof.

Je hebt dan alle formules nodig. Dergelijke problemen verdeel je in:

- de energie die nodig is voor de fase-overgang en
- de energie die nodig is voor de temperatuurstijging (of -daling).

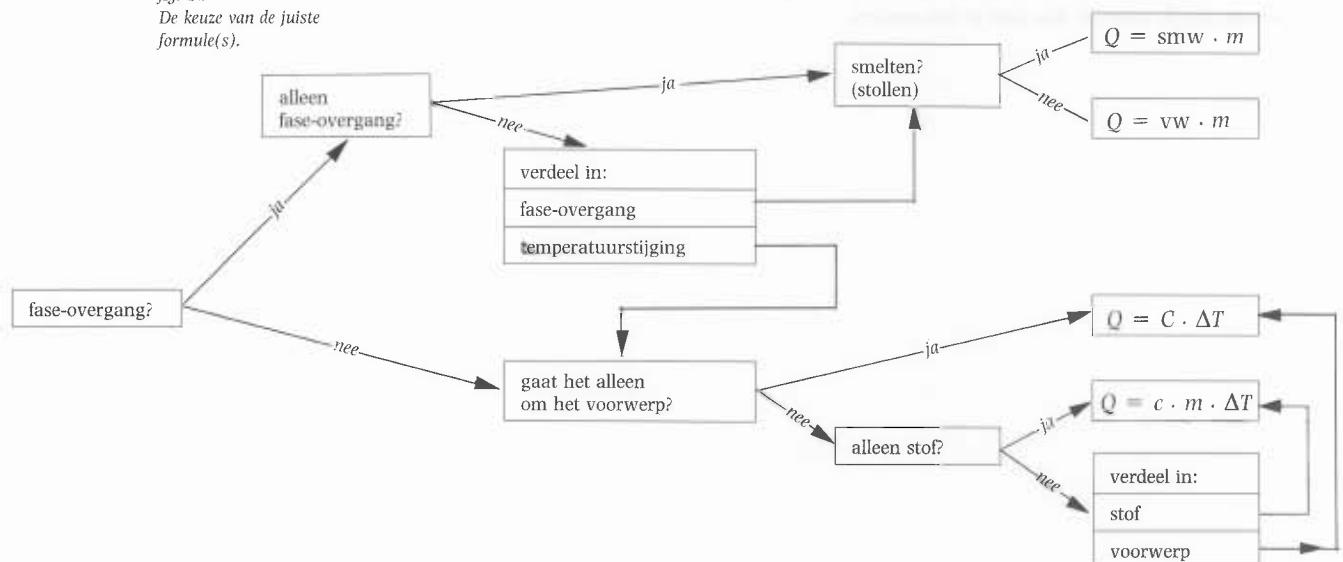
Voor de fase-overgang maak je gebruik van de formules onder 2 ($Q = smw \cdot m$ of $Q = vw \cdot m$).

Voor de temperatuurstijging (of -daling) gebruik je de formu- les onder 1 ($Q = c \cdot m \cdot \Delta T$ of $Q = C \cdot \Delta T$).

Het schema in figuur 35 kun je gebruiken om de juiste for- mule te vinden.

fig. 35

De keuze van de juiste formule(s).



Eenheden

Een grootte kan in verschillende eenheden zijn uitgedrukt. De soortelijke warmte kan bijvoorbeeld zijn uitgedrukt in $\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$. Reken dit altijd om naar $\text{J/kg} \cdot \text{K}$, de standaard-eenheid.

Een vuistregel is verder: kies de eenheden zó, dat ze (in de formule) bij elkaar passen.

Dus: de eenheid van soortelijke warmte is $\text{J/kg} \cdot \text{K}$. In de formule $Q = c \cdot m \cdot \Delta T$ moet je dan m in kg en Q in J invullen. Als m en Q in g en kJ zijn uitgedrukt, moet je die waarden omrekenen voordat je ze in de formule gebruikt. Hieronder volgen twee rekenvoorbeelden. Je ziet dan meteen hoe je figuur 37 kunt gebruiken.

Voorbeeld 1

500 g koper van 500°C wordt in water gedompeld. De eindtemperatuur van water en koper is 75°C .

Bereken hoeveel energie het water opneemt.

Gegeven:

$$m_{\text{koper}} = 500 \text{ g} = 0,500 \text{ kg} \text{ (Metten omrekenen!)}$$

$$T_{\text{begin}} \text{ van het koper} = T_b = 500^\circ\text{C}$$

$$T_{\text{eind}} = T_e = 75^\circ\text{C}$$

Gevraagd:

$$Q_{\text{opgenomen}} (Q_{\text{op}}).$$

Oplossing:

Je gebruikt de wet van behoud van energie:

$Q_{\text{opgenomen}} = Q_{\text{afgegaan}}$, kortweg: $Q_{\text{op}} = Q_{\text{af}}$. We kunnen Q_{af} berekenen (want we hebben immers de gegevens van het koper).

Je gebruikt het schema om de juiste formule te vinden. Bij 500°C en bij 75°C is koper in de vaste fase. Er is dus geen fase-overgang en daarom gebruik je de formule

$$Q_{\text{af}} = c \cdot m \cdot \Delta T. \text{ Alleen de stof koper staat hier warmte-energie af} \Rightarrow Q_{\text{af}} = c \cdot m \cdot \Delta T.$$

Uitwerking:

$$c = 0,39 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K} = 390 \text{ J/kg} \cdot \text{K} \text{ (Metten omrekenen!)}$$

$$m = 500 \text{ g} = 0,500 \text{ kg}$$

$$\Delta T = 500 - 75 = 425^\circ\text{C} \text{ (of K; het verschil is gelijk).}$$

$$\text{Invullen in } Q = c \cdot m \cdot \Delta T \text{ geeft: } Q_{\text{af}} = 390 \cdot 0,500 \cdot 425 \Rightarrow Q_{\text{af}} = 82\,875 \text{ J} = 83 \text{ kJ (afgerond).}$$

Het koper staat 83 kJ af, dus het water neemt 83 kJ op.



Voorbeeld 2

100 g ijs wordt van 0°C verwarmd tot 20°C . Bereken hoeveel energie daarvoor nodig is.

Gegeven:

$$m_{\text{ijs}} = 100 \text{ g} = 0,100 \text{ kg}$$

$$T_b = 0^\circ\text{C}$$

$$T_e = 20^\circ\text{C}.$$

Oplossing:

Alleen het ijs neemt energie op, dus je berekent Q_{op} . Je gebruikt het schema om de juiste formule te vinden. Er is sprake van een fase-overgang (ijs smelt), maar er is ook sprake van temperatuurstijging. We verdelen het probleem in:

- de fase-overgang ($Q = \text{smw} \cdot m$) en
- de temperatuurstijging van het smeltwater ($Q = c \cdot m \cdot \Delta T$).

Uitwerking:

a De fase-overgang.

$$\left. \begin{array}{l} Q_{\text{op},1} = \text{smw} \cdot m \\ \text{smw} = 334 \text{ kJ/kg} = 334\,000 \text{ J/kg} \\ m = 100 \text{ g} = 0,100 \text{ kg} \end{array} \right\} \Rightarrow Q_{\text{op},1} = 334\,000 \cdot 0,100 \text{ J} = 33\,400 \text{ J}.$$

b De temperatuurstijging.

$$\left. \begin{array}{l} Q_{\text{op},2} = c \cdot m \cdot \Delta T \\ c = 4,18 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K} = 4180 \text{ J/kg} \cdot \text{K} \\ m = 0,100 \text{ kg} \end{array} \right\} \Rightarrow Q_{\text{op},2} = 4180 \cdot 0,100 \cdot 20 \text{ J} = 8360 \text{ J}.$$

$$\Delta T = 20^\circ\text{C} \rightarrow \Delta T = 20 \text{ K}$$

$$Q_{\text{op,tot}} = Q_{\text{op},1} + Q_{\text{op},2} \Rightarrow Q_{\text{op,tot}} = 33\,400 + 8360 \text{ J} = 41\,760 \text{ J} = 42 \text{ kJ}.$$

(Het is het beste om pas op het einde je uitkomst af te ronden.

Als je de uitkomst van elke tussenstap afrondt, is je einduitkomst minder betrouwbaar.)

Gebruik bij het beantwoorden van de vragen zonodig de tabellen in figuur 1 en 2.

1 2,5 kg aluminium wordt verwarmd van 400 K tot 600 K. Bereken de energie die daarvoor nodig is.

2 Bereken hoeveel energie nodig is om 170 g zilver te smelten.

3 3,0 kg lood wordt verwarmd van 500 K tot 700 K. Bereken hoeveel energie daarvoor in totaal nodig is.

4 260 g waterdamp van 130°C wordt afgekoeld tot water van 50°C .

Bereken hoeveel energie daarbij vrijkomt.

5 De warmte die vrijkomt in vraag 4 wordt gebruikt om 2,0 kg koper te verwarmen.

Bereken de temperatuurstijging van het koper.

Blok 22 Extrastof

E1 Onderzoek aan radiatorfolie

Dit onderzoek is een 'open opdracht'; dat houdt in dat je zelf moet bedenken hoe je het onderzoek uitvoert.

In T5 werd radiatorfolie als hulpmiddel tegen onnodig energieverlies al genoemd. Dit materiaal bestaat uit een glaswol-deken, waar aan één kant een glimmende laag aluminium-folie op zit (figuur 36).

De opdracht is:

'Onderzoek welke kant van het radiatorfolie het beste aan de kant van de radiator kan zitten.'

Bedenk wat je als 'proef-radiator' kiest.

Beschrijf eerst de proef die je wilt uitvoeren en maak een lijst van de benodigde materialen.

Zorg dat je tot een duidelijke conclusie komt.

fig. 36

Een stuk radiatorfolie.



Blok 22

E2 Proef: Het bepalen van de condensatiewarmte van water

In deze extrastof bepalen we de condensatiewarmte van water. De proefopstelling vind je in figuur 37.

Twee opmerkingen vooraf:

- 1 Je kunt de proef van dit extrastofblad het beste met z'n tweeën uitvoeren; de eigenlijke proef duurt wel niet lang, maar er zijn veel voorbereidingen nodig.
- 2 Bestudeer thuis de stukken 'Het principe van de proef' en 'De uitvoering van de proef' goed voordat je de proef gaat uitvoeren; anders gaat er van alles mis.

Het principe van de proef

We verdampen water in het linkervat en laten de damp condenseren in het rechtervat. Om de condensatiewarmte te kunnen berekenen, moet je weten:

- hoeveel kg waterdamp in het rechtervat is gecondenseerd;
- hoeveel warmte-energie daarbij vrijkwam.

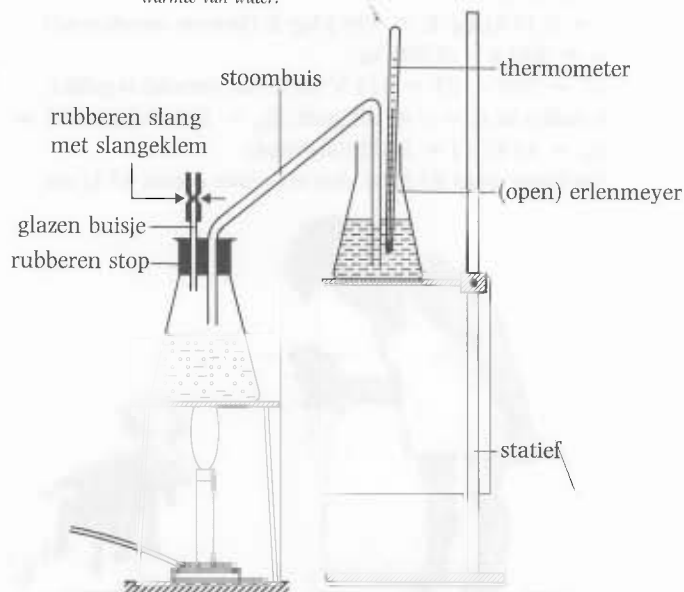
De massa van de gecondenseerde damp kun je bepalen door het rechtervat voor en na de proef te wegen.

De vrijgekomen energie kun je berekenen uit de massatoename van het rechtervat met inhoud, en de temperatuurstijging in het rechtervat. De temperatuurstijging vinden we door de begin- en eindtemperatuur in het rechtervat te meten.

Er zijn twee factoren die de betrouwbaarheid van onze uitkomst beïnvloeden:

fig. 37

De proefopstelling voor de bepaling van de condensatiewarmte van water.



1 Er kan al waterdamp condenseren (dus: condensatiewarmte vrijkomen) vóórdat de waterdamp in het water van het rechtersvat terecht komt. De betrouwbaarheid van onze uitkomst wordt kleiner als die condens in het rechtersvat terecht komt (en dus de massa van dat vat vergroot). De condensatiewarmte werd immers niet aan het vat afgestaan, maar (via de stoombuis) aan de omgeving. Vandaar de speciale vorm van de stoombuis: condens die in het omhooglopende deel van de buis ontstaat, loopt terug in het linkervat en komt dus niet in het rechtersvat terecht. Het stuk stoombuis vanaf de top tot het water in het rechtersvat is zo kort mogelijk gehouden, zodat daarin niet veel stoom kan condenseren.

2 Het rechtersvat zou feitelijk een warmtemeter moeten zijn. Als die beschikbaar is, kun je voor het rechtersvat dus beter een warmtemeter nemen in plaats van een erlenmeyer. De rechter-erlenmeyer zal immers warmte met de omgeving uitwisselen. Als je rechts toch met een erlenmeyer moet werken, kun je de fout die dit veroorzaakt als volgt beperken.

- Vul de rechter-erlenmeyer met zo koud mogelijk kraanwater (de kraan eerst goed laten doorlopen voor je 300 g water in het vat doet). Stel: het water in je rechtersvat is 15°C en de temperatuur van het lokaal is 20°C . Je gaat dan door met stoom inleiden tot de eindtemperatuur in de rechter-erlenmeyer 25°C is geworden. Tijdens de temperatuurstijging van 15°C tot 20°C neemt de erlenmeyer met inhoud dus extra warmte uit het warmere lokaal op. Maar tijdens de stijging van 20°C naar 25°C staat de erlenmeyer met inhoud ongeveer evenveel energie aan de (nu minder warme) omgeving af. De meetfout wordt nu dus kleiner!

Merk op dat je met deze proef eigenlijk óók de verdampingswarmte van water bepaalt, want volgens de wet van behoud van energie zijn verdampings- en condensatiewarmte van dezelfde stof immers gelijk.

Rekenvoorbeeld

Stel: T_b in het rechtersvat is $13,0^\circ\text{C}$ en T_e is $29,0^\circ\text{C}$. De temperatuurstijging is dus: $\Delta T = 29,0 - 13,0 = 16,0^\circ\text{C}$.

Stel: de massa van het lege rechtersvat is 300 gram. Gevuld met water van 13°C is de massa 880 g; bij het begin van de proef zit er dus $880 - 300 = 580 \text{ g} = 0,580 \text{ kg}$ water in het rechtersvat. Na de proef heeft het vat met inhoud een massa van 896 gram. Dan is er dus $896 - 880 = 16 \text{ g} = 0,016 \text{ kg}$ waterdamp in het vat gecondenseerd.

Stel: het rechtersvat is een warmtemeter met een warmtecapaciteit (zonder het water) van 125 J/K . Dan wordt je berekening als volgt.

Het water dat zich bij het begin van de proef in de warmtemeter bevindt en de warmtemeter zelf nemen warmte op; dus:

$Q_{op} = m \cdot c \cdot \Delta T + C \cdot \Delta T = 0,580 \cdot 4180 \cdot 16,0 + 125 \cdot 16,0 \text{ J}$. (Als je rechts een erlenmeyer gebruikt, vervalt de term $125 \cdot 16,0$, want dat is de hoeveelheid warmte die de warmtemeter opneemt.)



$$Q_{op} = 38\,790 + 2000 = 40\,790 \text{ J.}$$

De stoom staat condensatiewarmte af en koelt (na condensatie) af van 100°C tot $29,0^\circ\text{C}$. Voor de afgestane energie geldt dus:

$$Q_{af} = m \cdot c_w + m \cdot c \cdot (100 - T_e) = 0,016 \cdot c_w + 0,016 \cdot 4180 \cdot (100 - 29,0) \Rightarrow$$

$$Q_{af} = 0,016 \cdot c_w + 4748 \text{ J.}$$

Uit $Q_{af} = Q_{op}$ volgt:

$$0,016 \cdot c_w + 4748 = 40\,790 \Rightarrow$$

$$0,016 \cdot c_w = 36\,042 \Rightarrow$$

$$c_w = 2\,252\,650 \text{ J/kg} = 2253 \text{ kJ/kg.}$$

Volgens de tabel in figuur 1 is de condensatiewarmte van water 2260 kJ/kg . De uitkomst van het rekenvoorbeeld wijkt daar dus $0,3\%$ van af. Dat is erg weinig, en je moet er dan ook rekening mee houden dat het resultaat van je proef meer zal afwijken van de waarde in de tabel. Maar dat wil niet zeggen dat je proef mislukt is; je werkt tenslotte niet met die hele dure en precieze laboratorium-uitrusting waarmee de tabelwaarde is bepaald.

De uitvoering van de proef

Benodigd materiaal:

- twee erlenmeyers (of een erlenmeyer plus een warmtemeter);
- een thermometer;
- een 'stoombuis' met twee knikken erin, diameter circa 1,5 cm;
- een glazen buisje van circa 1 cm diameter, circa 10 cm lang;
- een op de erlenmeyer passende rubberstop, voorzien van twee boringen voor de stoombuis en het 10 cm lange buisje;
- een circa 8 cm lang slangetje dat op het glazen buisje past;
- een slangeklem;
- een driepoot met gaasje;
- een gasbrander;
- een statief voor de hoger geplaatste erlenmeyer (of de warmtemeter);
- een balans.

Werkwijze:

- Bepaal de massa van de lege warmtemeter (of de lege erlenmeyer);
- Vul beide erlenmeyers (of één erlenmeyer en de warmtemeter) met circa 300 g water. (Als je geen warmtemeter hebt, moet het water voor de rechter-erlenmeyer zo koud mogelijk kraanwater zijn.)
- Bepaal de massa van de warmtemeter (of de rechter-erlenmeyer) met water.
(Je kunt dan later uitrekenen hoeveel gram water er vóór de proef in het rechtersvat zat.)

- Bouw de opstelling zoals in figuur 37. Zorg dat de slangeklem in het linkersvat open is, zodat er stoom kan ontsnappen. Zorg dat de stoombuis in het rechtersvat onder het wateroppervlak van het rechtersvat zit.
- Breng het water in het linkersvat aan de kook, en zorg dat het tijdens de proef flink blijft koken. Bepaal ondertussen – na roeren – de temperatuur van het water in het rechtersvat: dit is T_b van het water.
- Draai nu de slangeklem dicht, zodat de stoom naar het rechtersvat gaat. (Brand je handen niet: gebruik een doek, en pas op voor de vlam van de gasbrander!)
- Roer met de thermometer in het rechtersvat en houd de temperatuur in de gaten. (De temperatuur in het rechtersvat moet minstens 15 °C zijn gestegen voordat je de stoomtoevoer beëindigt.)
- Draai de slangeklem weer los zodra de temperatuur in het rechtersvat voldoende is gestegen en bepaal na roeren de eindtemperatuur T_e in het rechtersvat.
- Bepaal nu opnieuw de massa van het rechtersvat met water. (Je moet daarna kunnen uitrekenen hoeveel water er in het rechtersvat is gecondenseerd.)

Uitwerking van de resultaten:

- Stel de vergelijking op waarin je aangeeft welke stoffen en voorwerpen energie opnemen en welke energie afstaan.
- Bereken met behulp van deze vergelijking de condensatiewarmte (= de verdampingswarmte) van water.
- Vergelijk de waarde die jij hebt berekend met die uit de tabel in figuur 1. Leg uit of de berekende waarde (vanwege warmte-uitwisseling met de omgeving) te hoog of te laag is.

Blok 22

E3

Isolatie

Bij de verwarming van huizen gaat het er om dat we met zo weinig mogelijk energie het huis zo goed mogelijk verwarmen. Dit komt er op neer dat we de hoeveelheid energie die het huis verlaat, moeten zien te beperken.

Als de temperatuur in huis constant is, kun je spreken van een evenwichtssituatie: de hoeveelheid energie die per tijds-eenheid aan het huis wordt toegevoerd, is even groot als de hoeveelheid energie die in die tijd het huis verlaat. We kunnen het energiegebruik terugdringen door de uitstroom van energie te beperken.

We hebben geleerd dat warmte-energie vanzelf getransporteerd wordt van plaatsen met een hoge naar plaatsen met een lage temperatuur. In huis gebeurt dit als plaatsen met een hoge temperatuur en plaatsen met een lage temperatuur

dicht bij elkaar liggen: bij muren, daken, vloeren, deuren en ramen.

De hoeveelheid energie die op die plaatsen wordt doorgelaten, hangt af van de volgende factoren:

- het temperatuurverschil tussen de warme en de koude plaats: hoe groter het verschil, hoe groter het transport van warmte-energie;
- de soort materiaal: hoe beter het de warmte geleidt, des te groter is het energietransport;
- de dikte van het materiaal: hoe dikker het materiaal, des te kleiner het energie-transport;
- de oppervlakte van het grensvlak: hoe groter het oppervlak, hoe groter het energie-transport.

Het temperatuurverschil hangt af van twee factoren: de binnen- en de buitentemperatuur. De buitentemperatuur hebben we uiteraard niet zelf in de hand. De dikte en de soort materiaal kunnen we wel zelf bepalen. Vooral de materiaalkeuze is van belang. Materialen die veel lucht bevatten – zoals tempex, kurk, hout, noppenfolie, porschuim, glaswol en steenwol – zijn slechte warmtegeleiders. Steen en beton geleiden de warmte veel beter.

Een circa 1,5 m dikke stenen muur 'isoleert' even goed als een 3 cm dikke laag isolatiemateriaal of een 15 cm dikke laag hout.

In de figuren 39, 40, 41 en 42 zie je grafieken van het temperatuurverloop in diverse materialen. Het temperatuurverschil is telkens 25 °C.

Als je kijkt naar het temperatuurverloop in enkel en dubbel glas (figuur 41 en 42) zie je dat de temperatuurdaling voor- namelijk plaatsvindt in de luchtlagen die dicht tegen het glas aan zitten.

Een bijkomend voordeel van het dubbel glas is de hogere temperatuur van de glasplaat aan de kant van de kamer, waardoor er minder snel condens op de ruit komt. Bovendien blijkt dubbel glas dieven af te schrikken; het is moeilijk – en zeker niet zonder veel lawaai – kapot te maken.

We zien dus dat het energieverlies bij dubbel glas beduidend

minder is dan bij enkel glas. De meeste nieuwbouwwoningen worden daarom opgeleverd met dubbel glas en met kleinere ramen dan in de jaren zeventig.

Andere vormen van isolatie die in bijna alle nieuwbouwwoningen worden toegepast, zijn vloer-, dak- en spouwmuurisolatie.

Oude woningen hebben vaak geen spouwmuur. Isoleren kan dan alleen door isolatiemateriaal aan de binnenkant van de muur aan te brengen en deze daarna weer af te dekken met gipsplaat of board.

fig. 38
Het warmtetransport in diverse materialen

materiaal	dikte (mm)	warmtetransport bij een temperatuurverschil van 10 °C (W/m ²)
glas	4	2000
beton	150	125
een-steens muur	210	50
spouwmuur	260	25
hout	15	125
gipsplaat	9	1000
glaswol	50	8
tempex (piepschuim)	30	12

fig. 39
Het temperatuurverloop in en 200 mm dikke betonnen wand.

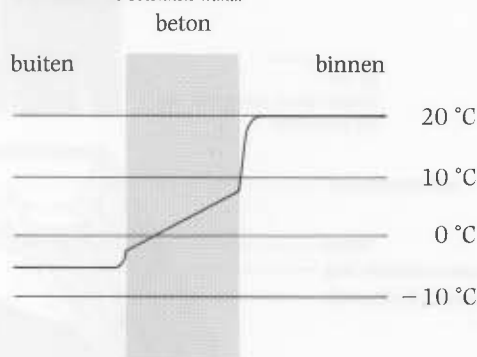


fig. 40
Het temperatuurverloop in een 200 mm dikke betonnen wand, waar aan de binnenkant een 40 mm dikke laag tempex tegenaan zit.

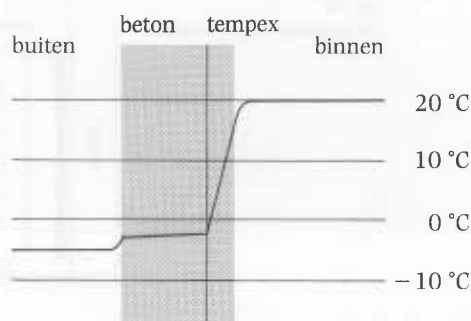


fig. 41
Het temperatuurverloop in een 6 mm dikke glazen plaat.

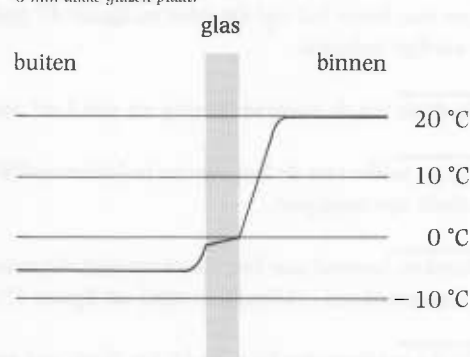
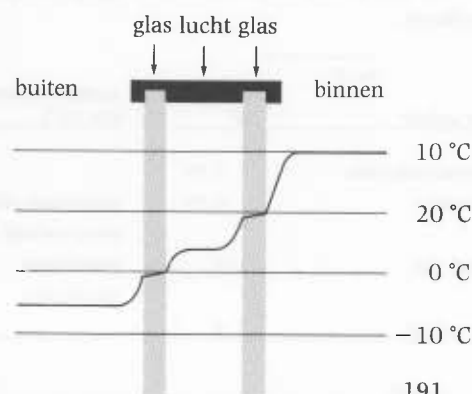


fig. 42
Het temperatuurverloop in dubbel glas (2 × 6 mm met 12 mm lucht).



Bestaande woningen met een spouwmuur kan men isoleren met schuim dat door kleine openingen tussen de muren wordt gespoten (figuur 43). Soms gebruikt men ook kleine bolletjes piepschuim.

In nieuwbouwwoningen worden tijdens de bouw meestal dekens of platen van steenwol of glaswol in de spouw aangebracht (figuur 44).

Energieverliezen door de vloer kunnen worden verkleind door isolatiemateriaal aan te brengen onder de vloer in de kruipruimte. (De kruipruimte is een ruimte onder de vloer van de begane grond.) Maar ook de vloer zelf kun je isoleren met vloerbedekking, vilt of hout. Plavuizen zijn als isolatie niet geschikt omdat steen de warmte vrij goed geleid. Een stenen vloer moet je aan de onderkant (in de kruipruimte) isoleren. Isoleren van het dak is tijdens de bouw heel eenvoudig door op het dakbeschoot isolatiemateriaal aan te brengen. Dit materiaal kan dan samen met de panlatten worden vastgespijkerd. Ook in bestaande woningen is dak-isolatie goed mogelijk. De doe-het-zelver kan tegen de binnenkant van het dakbeschoot isolatiemateriaal aanbrengen (figuur 45).

Een betrekkelijk eenvoudige en goedkope isolatie is de zogenaamde radiatorfolie (figuur 46) die achter de radiator wordt aangebracht. De folie kaatst de warmte die de radiator naar achteren uitstraalt terug de kamer in. Dat levert een behoorlijke energiebesparing op.

Iemand die wil gaan isoleren, zal zich afvragen: wat kost mij dat en wat levert het op? De tabel in figuur 47 geeft daarvan een aardige indicatie.

1 Ga thuis via de energierekening na wat 1 m³ aardgas kost.

2 Ga na welke van de beschreven isolatiemogelijkheden bij jou thuis zijn toegepast.

3 Bereken hoeveel jaar het duurt voordat die maatregelen zijn terugverdiend. (Gebruik de tabel uit figuur 47.)

4 Welke maatregelen kunnen bij jou thuis nog genomen worden? Bereken hoeveel geld dit kost en ga na in hoeveel jaar die maatregelen zijn terugverdiend.

5 Noem een aantal andere redenen (dan geldbesparing) om te isoleren.

fig. 47

soort isolatie	prijs per m ² (f)	aardgasbesparing per jaar (m ³)
spouwmuurisolatie	7,50	10
dakisolatie	6,50	verwarmde zolder 11 onverwarmde zolder 5
dubbel glas	135	woonkamer 30 slaapkamer 15
vloerisolatie	6	5

fig. 43
Het aanbrengen van porschuim
in de spouw van een bestaande
woning.



fig. 44
Het aanbrengen van glaswol
tijdens de bouw.



fig. 45
Isolatie van de binnenkant van
het dakbeschoot.

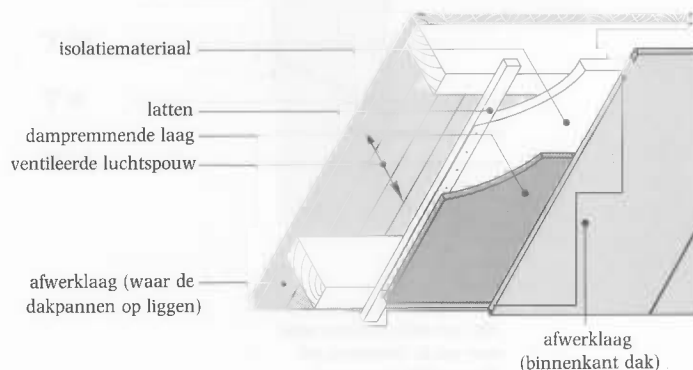
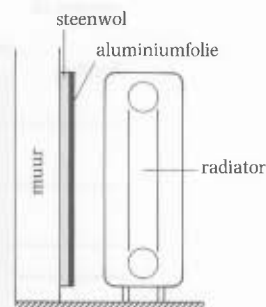


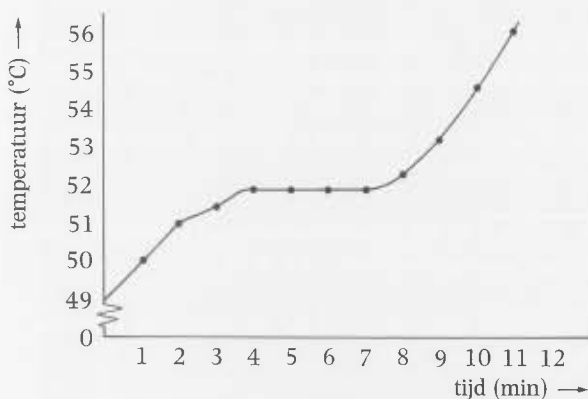
fig. 46
De toepassing van radiatorfolie.



E4 Oefenen met examenopgaven

1 Een onbekende vaste stof wordt gelijkmatig verwarmd totdat hij is gesmolten. Ook de vloeistof wordt nog enige tijd verwarmd. De temperatuur wordt elke minuut gemeten. De resultaten van de proef staan in figuur 48.

fig. 48
Temperatuur-tijdgrafiek van het verwarmen van een vaste stof.



- Bepaal met behulp van de gegevens over vaste stoffen, vloeistoffen en gassen in je tabellenboek, om welke stof het hier gaat.
- Aan de grafiek is te zien dat de soortelijke warmte van de gesmolten stof niet gelijk is aan die van de vaste stof. Leg uit in welke fase van de stof de soortelijke warmte het grootst is.

2 In de ketel van een centrale verwarming wordt aardgas verbrand om het water in de ketel te verwarmen. Niet alle energie die vrijkomt bij de verbranding van het aardgas, komt in het water terecht; er gaat ook warmte verloren. Om te bepalen welk deel van de energie die bij de verbranding vrijkomt werkelijk wordt gebruikt om het water te verwarmen, heeft iemand de volgende gegevens verzameld:

- per minuut stroomt 10 liter (= 10 kg) water door de ketel;
- het water gaat de ketel in met een temperatuur van 65 °C en komt er uit met een temperatuur van 85 °C;
- de soortelijke warmte van water is 4200 J/kg · K;
- per minuut wordt een hoeveelheid aardgas verbrand die 1200 kJ warmte oplevert.

Bereken hoeveel procent van de opgewekte warmte in het water komt.

3 Parfums bestaan voor een groot deel uit stoffen die gemakkelijk verdampen.

Leg uit waarom het koud aanvoelt als je wat parfum op je huid doet.

4 Jeroen wil de soortelijke warmte van lood bepalen. Hij gebruikt daarvoor de opstelling die is getekend in figuur 49a en 49b.

De proef verloopt als volgt.

Jeroen hangt eerst een blokje lood van 105 g aan een touwtje een paar minuten in kokend water in bekglas 1, zodat het blokje dezelfde temperatuur krijgt als het kokend water. Dan haalt hij het lood er uit, droogt het snel af en doet het in een ander bekglas (2). In bekglas 2 zit 100 g water met een temperatuur van 18 °C. Na goed roeren loopt de temperatuur van het water in bekglas 2 op tot 20 °C. Daarna koelt het geheel langzaam af.

De soortelijke warmte van water is 4,2 kJ/kg · K.

- Bereken de hoeveelheid energie die nodig is om 100 g water 2,0 K in temperatuur te laten stijgen.
- Bereken welke waarde Jeroen vindt voor de soortelijke warmte van het lood. Neem aan dat de energie die het lood afstaat alleen wordt gebruikt voor het opwarmen van het water.
- Als je de werkelijke waarde van de soortelijke warmte van lood in een tabellenboek opzoekt, zie je dat die hoger is. Leg uit hoe het komt dat de waarde die je hebt berekend te laag is.

5 Pien wil de warmtecapaciteit van een thermometer bepalen. Zij zet de thermometer in 100 g water van 20 °C dat ze verwarmt tot 70 °C. Om het water en de thermometer te verwarmen heeft Pien 21 250 J nodig. De soortelijke warmte van water is 4,2 kJ/kg · K.

Bereken de warmtecapaciteit van de thermometer.

fig. 49
Opstelling om de soortelijke warmte van lood te bepalen.

