

Blok 7 Verwarmen

INHOUD

PRACTICUM

- P1 Verwarmen van huizen
- P2 Temperatuur en warmte
- P3 Warmtetransport
- P4 Even warm met minder energie

BASISSTOF

- TW1 Verwarmen van huizen
- TW2 Temperatuur en warmte
- TW3 Warmtetransport
- TW4 Even warm met minder energie

HERHAALSTOF

- H1 Begrippen uit dit blok
- H2 Waar hangt het warmtetransport vanaf?
- H3 Verbrandingswarmte en rendement

EXTRASTOF

- E1 Warm water in Kenya
- E2 Rekenen aan de c.v.-installatie
- E3 Oefenvragen en opgaven

TIJDSINDELING

P1	1 lesuur
T1, W1	1 lesuur
P2	1 lesuur
T2, W2	1 lesuur
P3	1 lesuur
T3, W3	1 lesuur
P4	1 lesuur
T4, W4	1 lesuur
D-toets	1 lesuur
H/E-stof	2 lesuren
E-toets	1 lesuur
Totaal	12 lesuren

BASISVORMING

Aan de orde komen de kerndoelen D 7 en D 8. De kerndoelen D 7.1 en D 7.3 worden echter in hoofdzaak besproken in blok 5 van deel 2m hv scheikunde.

DE STOF

De c.v.-installatie neemt als context in dit blok een voorname plaats in. De belangrijkste onderdelen, de werking en het ontwerp van de c.v.-installatie komen uitvoerig ter sprake. Ook de beveiliging krijgt aandacht. Proeven met de klimaatkamer (meting en registratie van de temperatuur met de computer) geven een goed inzicht in het verwarmen van ruimten en het effect van diverse isolatiematerialen.

Het onderscheid tussen warmte en temperatuur en de drie wijzen van warmtetransport komen aan de orde. Ten slotte wordt veel aandacht besteed aan het zuinig omspringen met energie bij verwarmen. Dat is immers de grootste post op onze energie-rekening.

BIJ BLOK 7

P1

De leerling inventariseert eerst zijn door ervaring verkregen kennis van de verwarmingsinstallatie. Daarna wordt met de klimaatkamer (een kleine modelwoning) het temperatuurverloop in huis onderzocht. Met de klimaatkamer kan ook de effectiviteit van diverse isolatiemaatregelen (dubbel glas, tempex, steenwol, kurk, enz.) worden onderzocht. De proef in P1 met de klimaatkamer is goed uit te voeren in korte tijd, mits op enkele dingen gelet wordt. Zie hiervoor het bijgevoegde artikel van J. van Riet uit het NVON-maandblad van 4 mei 1990 in de bijlage achter dit blok.

Enkele praktische punten hieruit:

- De klimaatkamer kan van 8 mm dik triplex gemaakt worden, van binnen bekleed met isolatiemateriaal, zoals radiatorfolie.
- Neemt men de afmetingen niet te groot (b.v. 20×20×20 cm) en een sterke lamp (b.v. 100 W) dan zijn reeds na 10 minuten de temperatuurverschillen voor diverse isolatie-materialen groot genoeg om goede conclusies te kunnen trekken!
- De plaats in de kamer waar de temperatuur gemeten wordt, is van groot belang. Voor de goede keuze: zie blz. 4 van de bijlage (figuur 17).
- Aanbevolen isolatie-materialen zijn: enkel en dubbel glas (met en zonder 'gordijn', met en zonder föhn), aluminium plaat (reflectie!).

- Er kan per klimaatkamer in één les slechts één meting gedaan worden, omdat de afkoeltijd minstens een half uur bedraagt. In de bijlage zijn drie kamers tegelijk in bedrijf; hiervoor wordt een computerversie ontwikkeld.
- De eindtemperatuur kan binnen een lesuur alleen (min of meer) bereikt worden, wanneer als klimaatkamer een blikken bus of een dunne kartonnen doos gebruikt wordt.

Benodigd materiaal:

- klimaatkamer
- computer met meetprogramma IP-Coach
- temperatuursensor
- meetpaneel
- lamp van 60 W resp. 150 W

BIJ BLOK 7

P2

Nagegaan wordt of de leerling de begrippen warmte en temperatuur al weet te onderscheiden. Door een proefje wordt nagegaan dat ons gevoel geen goede temperatuurmeter is. Vervolgens worden eerst een speld en daarna een spijker opgewarmd tot 450 °C en daarna afgekoeld in water. De temperatuurstijging blijkt alleen bij de spijker meetbaar. (Eigenlijk een inleiding tot het begrip warmtecapaciteit.)

In dezelfde pan wordt eerst 250 g en dan 500 g water tot koken verhit vanaf dezelfde begintemperatuur. De tijden worden gemeten en vergeleken. Voor het verschil wordt een verklaring gevraagd.

Opmerking: Om de tijd voor de proef te bekorten kunt u uitgaan van geiserwater, dat al voorverwarmd is tot b.v. 60 °C.

De werking van een temperatuursensor wordt verkend door deze eerst in heet water te zetten, dan eruit te halen en na enige tijd weer in het warme water terug te plaatsen. Van de verkregen grafiek wordt een verklaring gevraagd.

Benodigd materiaal:

- Proef 2: drie bekeerglazen met resp. koud, lauw en warm water; thermometer (demonstratieproef).
- Proef 3: bekeerglas met 50 ml water, thermometer, speld en (grote) spijker, gasbrander, kroezentang of iets dergelijks om speld en spijker in vlam te houden (demonstratieproef).
- Proef 4: twee gelijke pannen die 250 resp 500 ml water bevatten van dezelfde begintemperatuur, thermometer, twee driepoten, twee dezelfde typen gasbranders, stopwatch of horloge met secondenwijzer (demonstratieproef).
- Proef 5: computer met meetprogramma IP-Coach, temperatuursensor, meetpaneel, bekeerglas met heet water (demonstratieproef).

BIJ BLOK 7

P3

Hierin worden de drie methoden van warmtetransport onderzocht:

Geleiding: Waarom voelt het ene materiaal (met dezelfde temperatuur) warm aan en het andere koud? De goede geleiding van metaal wordt onderzocht. Geleiders en isolatoren worden onderscheiden (leerlingproef).

Stroming: In een demonstratieproef wordt stroming bij lucht (papieren spiraal boven kaars of radiator) en bij water (watercircuit in glasbuis) onderzocht. Het effect van stroming en geleiding wordt vergeleken bij het smelten van een blokje ijs (demonstratieproef).

Straling: Afgesloten erlenmeyers met een verzilverde resp. beroete bodem zijn beide verbonden met een watermanometer. De bodems ontvangen evenveel straling van een lamp. Voor het verschil wordt een verklaring gevraagd. Daarna wordt de temperatuurdaling van twee gelijke blikjes (een matzwart en een blinkend), gevuld met evenveel water van dezelfde temperatuur vergeleken. De conclusie is wellicht wat moeilijk: een voorwerp dat makkelijk straling opneemt zal ook makkelijk straling afgeven.

Gevraagd wordt naar de beste bestrijding van warmteverliezen bij geleiding, stroming en straling.

Benodigd materiaal:

- Proef 1: per groepje leerlingen acht blokjes van een isolator resp. geleider, zoals: ijzer, messing, zink, aluminium, PVC, vurehout, glas en kurk
- Proef 2: ijzeren strip met vijf gaatjes waarin lucifers kunnen steken, gasbrander, statief met kruisklem (demonstratieproef).
- Proef 3: spiraal van tekenpapier, draadje, statief, kaars (demonstratieproef).
- Proef 4: rechthoekige waterbuis aan onderste hoekpunt omwoeld met wat kopergaas, gasbrander, enkele korrels permanganaat als kleurstof (demonstratieproef).
- Proef 4: kroezentang, twee reageerbuisen, twee (ongeveer) gelijke stukjes ijs die in de reageerbuisen passen, in de reageerbuis passende moer of stukje metaal om één blokje te verzwaren, gasbrander (demonstratieproef).
- Proef 5: twee gelijke erlenmeyers voorzien van doorboorde stop om elk aan te sluiten op een watermanometer, bodem van één erlenmeyer beroet met beetje brandende benzeen, bodem andere erlenmeyer omhuld met aluminiumfolie, lampvoet met lamp van 100 W (demonstratieproef).
- Proef 6: twee dezelfde conservenblikjes (liefst klein formaat): het ene moet uitwendig glimmend zijn, het andere mat zwart geverfd, twee thermometers, gelijke hoeveelheden warm water van gelijke begintemperatuur (demonstratieproef).

BIJ BLOK 7

P4

Hierin moet de leerling het energiegebruik voor verwarming thuis onderzoeken. Isolatiemaatregelen, tochtbestrijding en het type woning worden meegewogen. Het resultaat wordt vergeleken met de gegevens uit blok 7 figuur 33 van het leerboek. Ten slotte worden een aantal isolatiematerialen onderling vergeleken.

Benodigd materiaal:

Proef 4: zet deze proef in aan het begin van de les, meet de eindtemperaturen aan het eind van de les:

- twee kleine conservenblikjes, waarvan één afsluitbaar met deksel; vijf of zes dubbelwandige conservenblikjes (klein blikje in groter blik, waarvan de dubbele wand is opgevuld met verschillende isolatiematerialen, zoals: lucht, glaswol, steenwol, piepschuim, tuinaarde, zaagsel, zand)
- gelijke hoeveelheden warm water (uit geiser) van dezelfde begintemperatuur (maatglas); enige thermometers (anders duren de metingen te lang)

BIJ BLOK 7

T1

De belangrijkste onderdelen van de c.v.-installatie en hun functies worden besproken:

- De c.v.-ketel met gasregelblok, branders, warmtewisselaar (voor de HR-ketel: zie T4).
- Het transportnet: de buizen en radiatoren (diverse typen in fig. 13 blz. 236 van het leerboek) met (thermostaat)kranen en circulatiepomp. (Wijs erop dat de pas later toegepaste pomp het gebruik van veel dünnere buizen heeft mogelijk gemaakt: snellere opwarming van het huis, goedkoper en minder ontsierend), het expansievat (vroeger werd hiervoor een overloopleiding in het hoogste punt van de installatie naar de dakgoot toegepast).
- Kamerthermostaat voor de temperatuurregeling (de werking van een eenvoudige bimetaal-thermostaat wordt in een leestekst met figuren besproken), het temperatuurverloop overdag wordt uitgelegd, de invloed van de ingestelde ketelwatertemperatuur daarop.
- De voornaamste factoren die een rol spelen bij het ontwerpen van een c.v.-installatie passeren de revue.
- Diverse beveiligingen van de c.v.-installatie, zoals de werking van waakvlam + thermokoppel (in moderne ketels vervangen door een elektronisch geregelde ontsteking: bespaart gas en vervuiling van het branderblok), vereiste hoeveelheid water in de installatie, te controleren door waterdrukmeter, overdrukventiel als beveiliging tegen koken, noodzaak van jaarlijkse controle (levert brandstofbesparing door schone branders, tijdige signalering van gebreken en goede werking beveiligingen).

BIJ BLOK 7

T2

Temperatuurmeting: werking van de vloeistofthermometer, de temperatuurschalen van Celsius, Fahrenheit en Kelvin (deels leesteksten).

Warmte als energiesoort (in joules), vaak in de vorm van 'afvalwarmte'.

De relatie tussen temperatuur en warmte, uitgelegd m.b.v. de molekuultheorie (kort herhaald in leestekst), begrip 'inwendige energie', in leestekst toegelicht m.b.v. smeltwarmte.

BIJ BLOK 7

T3

Warmte als energie op transport, uitleg waarom geleiders van kamertemperatuur koud aanvoelen.

- Geleiding: de molekulen geven hun trillingsenergie door maar blijven op hun plaats in het rooster, invloed van soort stof en temperatuurverschil op het geleidingsvermogen. Geleiders en isolatoren.
- Strooming: de functie hiervan bij verwarming van huizen. (De molekulen verplaatsen zich nu bij het doorgeven van energie.)

- Straling: warmtetransport waarbij géén medium vereist is (warmtetransport van zon naar aarde). Overeenkomsten met licht: terugkaatsing en absorbtie. Invloed van kleur en aard oppervlak.

Ten slotte de thermosfles: uitleg hoe energieverlies door geleiding, strooming en straling hierbij zoveel mogelijk wordt tegengegaan.

BIJ BLOK 7

T4

Verwarming van het huis vereist ca. 75% van ons energieverbruik. Besproken wordt hoe hierop te besparen; niet alleen voor de portemonnee, maar óók voor het milieu.

Met gezond verstand en geschikte kleding in huis is veel te besparen.

Vermijden van tocht en toepassing van geschikte isolatiematerialen (spouwmuur- en dakkap-isolatie, toepassing van dubbel glas en radiatorfolie) worden besproken. Dat de kosten van die maatregelen zichzelf snel laten terugverdienen moet blijken uit het energieverbruik en het rendement.

Het begrip rendement wordt uitgelegd.

De begrippen verbrandingswarmte en gemiddeld vermogen worden toegelicht. Verbrandingswarmte is niet alleen voor 'gewone' brandstoffen maar ook voor levensmiddelen een belangrijk begrip.

Zuinig stoken kan worden bevorderd door een geschikte ketel (voor de meeste huizen is een ketel met verhoogd rendement geschikt; de kosten van een HR-ketel met bijkomende kosten van aanleg wegen in kleinere huizen meestal niet op tegen de besparing).

Behalve aan goede isolatiemethoden wordt ook aandacht besteed aan een 'slimme' indeling van het huis en een geschikt ventilatiesysteem.

BIJ BLOK 7

H1

Eerst moeten zestien nieuwe begrippen uit het blok worden omschreven. Vervolgens worden vijf vragen gesteld die te maken hebben met de c.v.-installatie, isolatie, rendement en warmtetransport door geleiding, stroming en straling.

BIJ BLOK 7

H2

Er worden acht vragen gesteld betreffende het transport van warmte. De begrippen geleiding, stroming en straling staan hierbij centraal.

BIJ BLOK 7

H3

De begrippen verbrandingswarmte en rendement worden nog eens herhaald. Daarna moeten hierover zeven vragen worden beantwoord.

BIJ BLOK 7

E1

Naar aanleiding van een brief van een in Kenya werkzame arts moet de leerlingen een aantal vragen daaruit beantwoorden. Het gaat om het zo economisch mogelijk bereiden van warm water in een land waar brandhout de voornaamste brandstof is, die van ver moet worden aangevoerd. De leerling in de rol van deskundige. Een aardig werkblad dat stimuleert tot nadenken.

BIJ BLOK 7

E2

Bij het berekenen van de capaciteit van een c.v.-installatie spelen veel factoren een rol. Er wordt informatie herhaald, maar ook nieuwe informatie verstrekt. Dit werkblad verschaft belangrijke informatie over de eisen waaraan een goede c.v.-installatie moet voldoen.

BIJ BLOK 7

E3

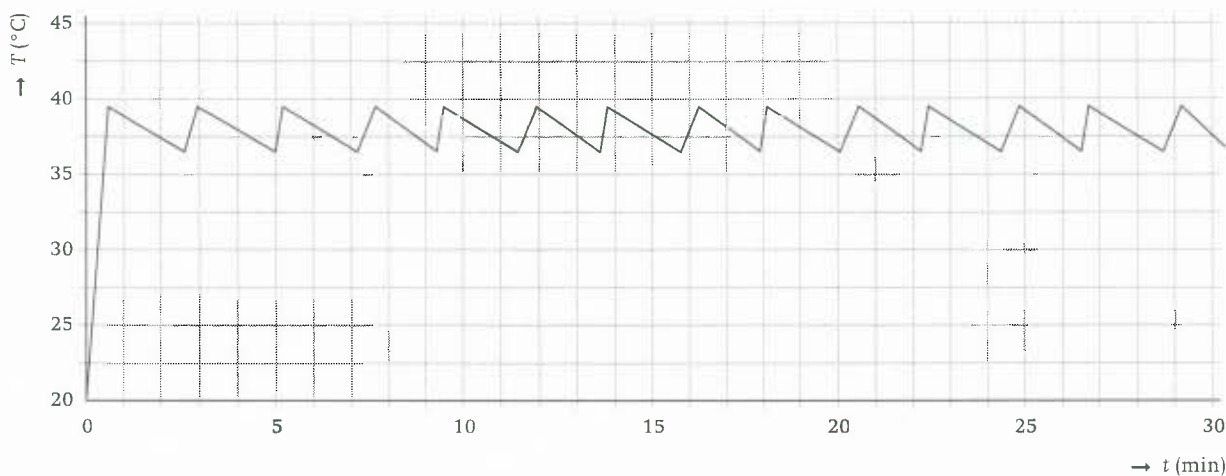
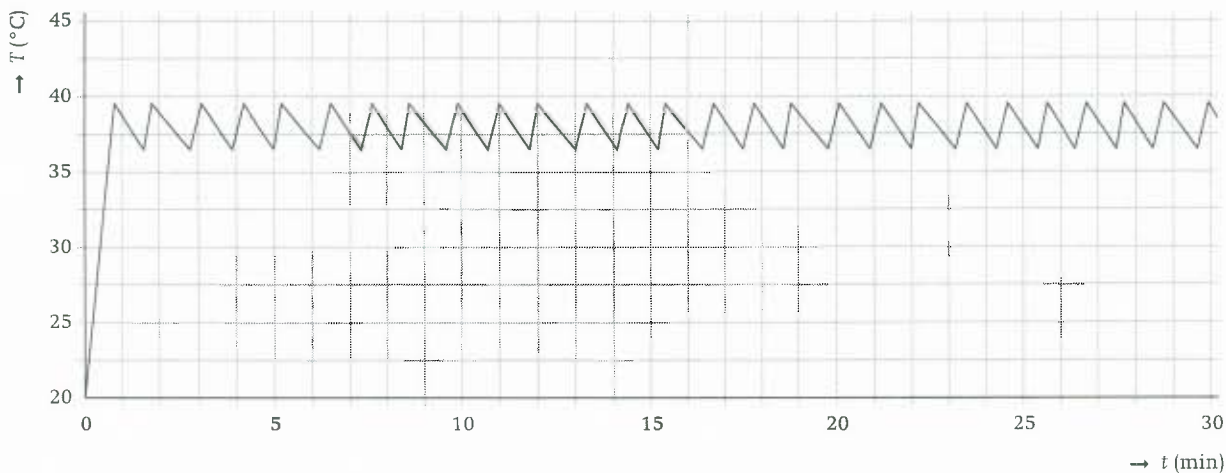
Dit E-blad geeft zeven vragen, die een beroep doen op een groot deel van de kennis die in blok 7 verworven moest worden. Een goede training voor de E-toets.

ANTWOORDEN BLOK 7

P1

- 1 Behalve een geschikte plaats voor ketel, leidingen en open haard moeten geschikte plaatsen worden gezocht voor de radiatoren (onder de ramen!) en de thermostaat op een niet te warme plaats in de woonruimte.
Functie, werking en plaats van de thermostaat worden in vraag 3 en 4 nagevraagd. De vragen 5 t.e.m. 9 worden gesteld n.a.v. de proeven met de klimaatkamer.
- 5 Uit de grafiek van kanaal 1 uit figuur 3 in P1 blijkt dat de temperatuur van de verwarming is ingesteld tussen 37 °C en 39 °C. Als na inschakeling van de lamp een temperatuur van 39 °C is bereikt, schakelt de lamp uit. De temperatuur daalt door uitstraling, waarna de lamp bij 37 °C weer aangaat. Dit proces herhaalt zich regelmatig. De gemiddelde temperatuur in de klimaatkamer wordt 38 °C.
Opmerking: In de bovenste regel van blz. 91 van het P-boek moet 35 °C drie maal worden vervangen door 37 °C.
- 6 Omdat de verwarming (lamp) schakelt met een marge van + 1 °C en - 1 °C. Als deze marge niet wordt ingesteld, schakelt de lamp voortdurend aan en uit. Dat is niet alleen zeer slecht voor de gloeidraad, maar er kan zich zo ook geen evenwichtssituatie instellen met de omgeving.
- 7 Daarvoor zou de klimaatkamer zeer goed moeten worden geïsoleerd van de omgeving. Dat is niet realistisch voor een model van een woning, die immers ook geventileerd moet worden.

- 8 Zie figuur. *Toelichting:* bij een lamp van 150 W stijgt de temperatuur sneller bij enkel glas, en nog sneller bij dubbel glas (minder verliezen). De temperatuurdaling is bij enkel glas hetzelfde, maar bij dubbel glas langzamer.



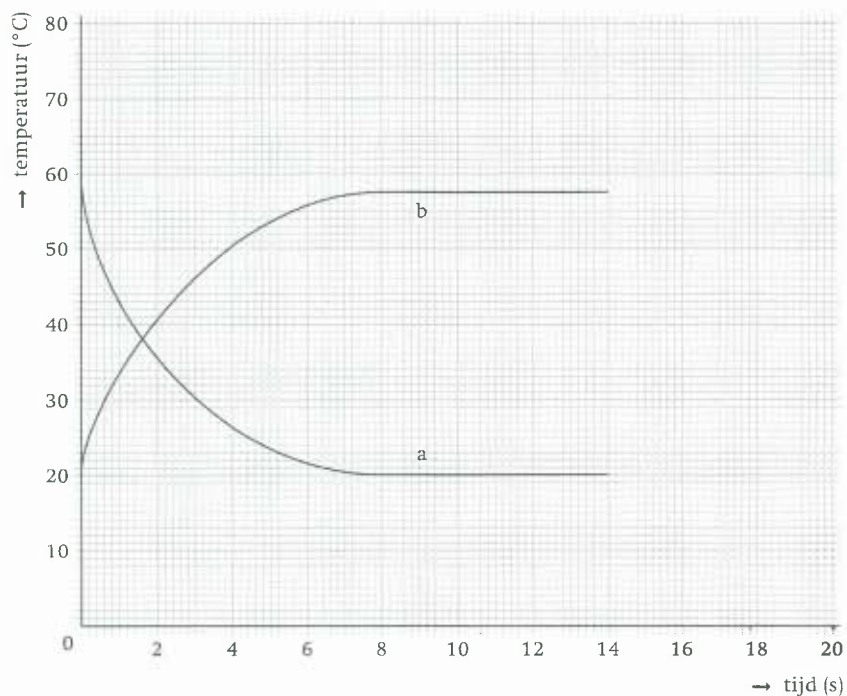
ANTWOORDEN BLOK 7

P2

- 1 Als je het koud hebt, dan vindt je de *temperatuur* in de kamer te laag. Om het warmer te krijgen, zet je de verwarming aan. De verwarming levert *warmte* aan de kamer. Daardoor stijgt de *temperatuur*. Er verdwijnt dan wel meer *warmte* naar buiten. De *temperatuur* in de kamer wordt weer constant. De *temperatuur* is dan hoger.
- 2 **a** De vinger die uit het koude water komt voelt warm aan, de vinger die uit het warme water komt voelt koud aan.
d Omdat de 'gevoelstemperatuur' wordt beïnvloed door de temperatuur die de vinger eerst had. Het lauwe water heeft maar één temperatuur, maar beide vingers voelen die verschillend.
- 3 **b** Temperatuur van de speld is ca. 450 °C.
c De temperatuur van het water in het bekersglas blijkt niet meetbaar veranderd.
d De temperatuur van het water in het bekersglas is nu wél meetbaar veranderd.
e De spijker bestaat uit veel meer ijzer dan de speld. De rest van de speld en spijker worden door geleiding óók warmer. Het opwarmen van de spijkerkop tot 450 °C duurt daarom langer dan bij de speldekop.
f Omdat aan de spijker meer warmte moest worden toegevoerd dan aan de speld zal de spijker bij afkoeling ook meer warmte afstaan dan de speld. Daarom zal het water in het bekersglas bij de spijker wél merkbaar stijgen.

- 4 a** Het water in beide pannen moet dezelfde begintemperatuur hebben, b.v. $60\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- b** In de pan met 250 g water zal het water veel eerder koken dan de pan met 500 g water, bijna in de helft van de tijd.
- c** De temperatuurstijging in beide pannen is natuurlijk even groot (b.v. $40\text{ }^{\circ}\text{C}$).
- d** Aan beide (gelijke) pannen moet evenveel, maar aan de 500 g water moet twee maal zoveel warmte worden toegevoegd als aan de 250 g om het water aan de kook te brengen.

5 ab Zie figuur.



- c** Figuur a: De temperatuur zakt eerst snel (groot temperatuurverschil met de omgeving). Daarna langzamer, omdat het temperatuurverschil met de omgeving steeds kleiner wordt.
- Figuur b: De temperatuur neemt in het begin snel toe (groot temperatuurverschil met de omgeving). Daarna langzamer, omdat het temperatuurverschil met de omgeving steeds kleiner wordt.
- d** Een voorwerp koelt af, als het in een omgeving komt die een lagere temperatuur heeft dan het voorwerp.

ANTWOORDEN BLOK 7

P3

- 1 **a** Nee.
b Het ijzer.
c Gerangschikt naar opklimmende warmtegeleidingscoëfficiënt zou de volgorde worden: kurk - vurehout - glas - PVC - ijzer - zink - messing - aluminium.
d De temperatuur van je hand is *hoger* dan de temperatuur van de voorwerpen.
e Omdat het meer warmte aan je hand onttrekt dan de stof van een ander voorwerp.
- 2 **a** Vanaf de gasvlam komen de luciferkoppen beurtelings tot ontbranding.
b Kurk, vurehout, glas en PVC zijn isolatoren; ijzer, zink, messing en aluminium zijn geleiders.
- 3 **a** De spiraal gaat ronddraaien met de klok mee.
b De opstijgende warme lucht botst tegen het papier en oefent daarbij een kracht uit die tot de draaiing leidt.
c Als er een druk- of temperatuurverschil in de lucht heerst.
d Het water stijgt boven de brander op, koelt in het hoogste horizontale stuk wat af, zakt omlaag in het andere verticale deel en stroomt dan terug richting gasvlam. (In figuur 9 blz. 97 van het P-boek circuleert het water dus tegen-de-klok-in).
f Als er temperatuurverschil heerst.
- 4 **a** In buis A.
b In buis B.
c Het klontje in buis A.
d Bij stroming verplaatst het warme water zich, bij geleiding niet. Bij stroming wordt dus veel sneller warmte toegevoerd aan het ijs.
- 5 **a** De druk in de beroete kolf neemt toe, die in de met aluminium beklede kolf maar zeer weinig.
b Het beroete oppervlak absorbeert warmtestraling, het met aluminiumfolie beklede oppervlak kaatst de meeste warmtestraling terug.
c De erlenmeyer met de beroete bodem; de lucht hierin is immers het sterkst uitgezet door de verwarming.
- 6 **c** Het blikje dat matzwart geverfd is.
e Een voorwerp dat makkelijk straling opneemt, zal ook makkelijk straling afgeven.

- 7 **a** Door te zorgen dat het bekersglas zo min mogelijk via geleiders contact maakt met de omgeving. Dus inpakken in isolatiemateriaal.
b Door te zorgen dat er geen stroming kan optreden in de lucht boven het hete water: afsluiten met een isolerend deksel.
c Door te zorgen dat het bekersglas geen warmte kan verliezen door straling naar de omgeving: inpakken in aluminiumfolie voordat je het glas in isolatiemateriaal inpakt.

ANTWOORDEN BLOK 7

P4

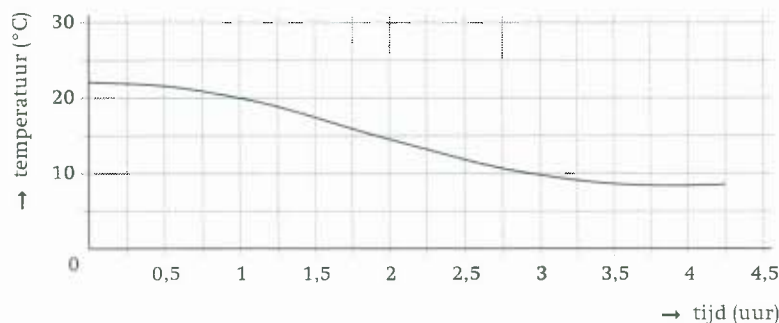
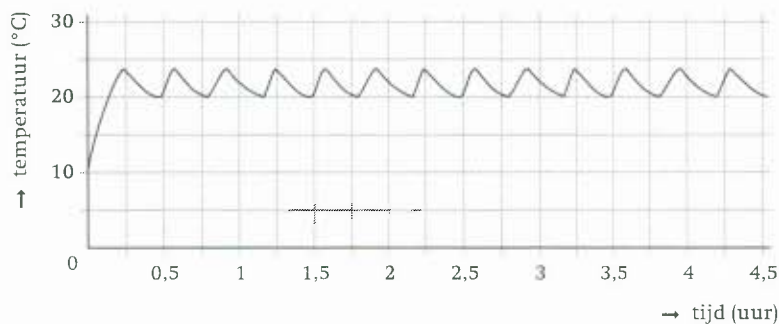
- De antwoorden op de vragen 1 t.e.m. 3 worden sterk bepaald door de persoonlijke omstandigheden. De temperatuurdaling in proef 4a zal het sterkst zijn bij een enkelwandig blikje zonder deksel, daarna bij een enkelwandig blikje met deksel, daarna bij een dubbelwandig blikje met lucht ertussen. Overige resultaten variëren met de gebruikte materialen.
c Bij het enkelwandig blikje zonder deksel: alleen minder stralingsverlies.
Bij het enkelwandig blikje met deksel: minder verlies door straling en stroming.

ANTWOORDEN BLOK 7

W1

- 1 **a** Het *gasregelblok* regelt de gastoevoer naar de branders.
De *branders* leveren door de verbranding de hete verbrandingsgassen.
De *warmtewisselaar* draagt de hitte van de verbrandingsgassen over aan het water.
De *circulatiepomp* regelt het watertransport door het leidingnet naar de radiatoren.
b De *schoorsteen* regelt de afvoer van de rookgassen.
De *waakvlam* (of de elektronische ontsteking) regelt de ontbranding van het gas.
Het *thermokoppel* bij de waakvlam voorkomt dat er gas kan gaan stromen als de waakvlam uit is.
De *radiatoren* leveren in huis warmte door straling en stroming van de lucht.
De *kamerthermostaat* (en/of de thermostaatkranen) regelen de temperatuur van de te verwarmen ruimten.
Het *expansievat* biedt het water de mogelijkheid om uit te zetten.
De *waterdrukmeter* toont aan of er voldoende water in de installatie zit.
Het *overstortventiel* beveiligd voor het geval het water in de ketel zou gaan koken.

2 ab Zie figuur.

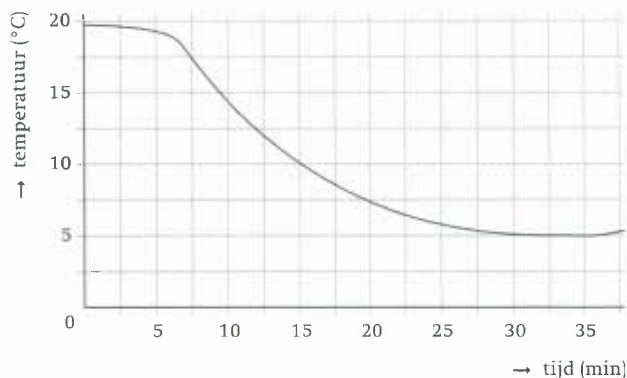


c Bij **a**: De warmtetoevoer blijft aanhouden tot de branders via een signaal van de thermostaat worden uitgeschakeld. Daarna treedt alleen warmte-afvoer van het huis naar buiten op, totdat de thermostaat de branders weer inschakelt.

Bij **b**: Nu treedt alleen warmte-afvoer op.

Bij **a** en **b** zie je: de temperatuur stijgt langzamer naarmate de temperatuur van het huis verder boven die van de omgeving komt. De temperatuur daalt langzamer naarmate de temperatuur die van de omgeving meer nadert.

3 a Zie figuur.



b 1 en 2 zijn onwaar, want de temperatuur daalt steeds verder naar 5 °C. Om die reden is 3 waar.

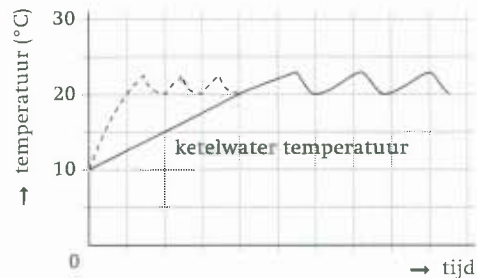
c 1 is waar als de omgevingstemperatuur van de cola hoger is dan de temperatuur van de cola zelf. 2 is waar als de omgevingstemperatuur van de cola gelijk is aan de temperatuur van de cola zelf.

4 a De thermostaat staat afgesteld op 20 °C.

b De radiatoren leveren nog warmte, want het water erin is niet ineens koud geworden.

c Het ketelwater en het water in de leidingen en radiatoren moeten eerst warmer worden.

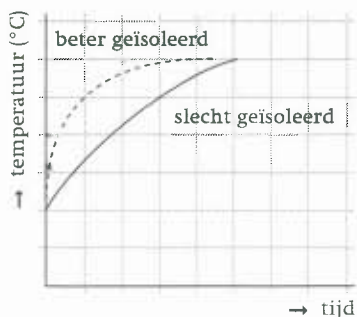
d Zie figuur.



5 a Op een elektronische thermostaat kunnen verschillende dag- en nachtprogramma's worden ingesteld.

b Het energieverbruik kan zo automatisch worden aangepast aan de behoefte, rekening houdend met de buitentemperatuur op dat moment. Ook kan zo'n programma zorgen dat de kamer al op temperatuur is, als je gaat ontbijten.

6 Zie figuur.



- 7 **a** De windsnelheid bepaalt de snelheid van de warmte-afvoer van het huis, dus de snelheid waarmee de temperatuur zal dalen als de verwarming niet brandt.
- b** – De ligging van het vertrek t.o.v. andere kamers (b.v. veel buitenmuur en weinig binnenmuur) en t.o.v. de meest voorkomende windrichting bepaalt weer de snelheid waarmee warmte wordt afgevoerd.
- De warmtebehoefte in een kamer die nooit bewoond wordt, een kamer waar uitsluitend geslapen wordt of een eet-, woon- of studeerkamer is niet hetzelfde.
- 8 **a** Als de warmtetoevoer maximaal is, heeft zich nog geen evenwicht ingesteld tussen de warmtetoevoer en de warmte-afvoer. Het duurt een tijd voor zich zo'n evenwicht heeft ingesteld.
- b** Een aantal uren na middernacht. De temperatuur van de aarde en de huizen is dan door de warmte-afvoer na zonsondergang het laagst geworden.
- 9 **a** Warmte is een vorm van energie.
- b** De eenheid van warmte is de joule.
- c** De eenheid van temperatuur is de °C.
- d** Als je de *temperatuur* in de kamer wilt verhogen, moet je *warmte* toevoeren. Door de hogere *temperatuur* verdwijnt er meer *warmte* naar buiten.

ANTWOORDEN BLOK 7

W2

- 1 **a** Met een thermometer.
- b** Door de temperatuurstijging zet de vloeistof uit. De uitzetting van de vloeistof is veel groter dan de uitzetting van het glas. Daardoor stijgt de vloeistof in het thermometerbuisje (capillair).
- c** De graad celsius. (Er bestaat ook een kelvinschaal en een fahrenheitschaal).
- 2 **ab** – Bij de verwarmingsketel om de watertemperatuur te controleren.
- In de thermostaat om de ingestelde kamertemperatuur te controleren.
- Buiten bij het raam om de buitentemperatuur te controleren.
- In diverse kamers, bij de wasmachine en in de koelkast om de temperatuur te controleren.
- 3 **a** Dan stijgt de gemiddelde snelheid van de molekulen.
- b** Het kost energie om de gemiddelde snelheid van de molekulen te verhogen.
- 4 **a** Van de soort stof, de hoeveelheid stof en de temperatuur.
- b** – Moleculen van verschillende soort hebben verschillende massa en trekken elkaar met verschillende kracht aan.
- Uit hoe meer moleculen de stof bestaat, hoe meer energie er per graad nodig is om de inwendige energie te verhogen.
- Hoe hoger de temperatuur van de stof is, des te groter is de inwendige energie.
- 5 **a** De kleinste kogel.
- b** Bij dezelfde energietoevoer zal de bewegingsenergie van de molekulen van de kogel die het kleinste aantal molekulen bevat, het meest stijgen. Vergelijk: als je in een kleine en een grote fles evenveel water doet, zal de kleine fles daardoor voller worden.
- 6 **a** In het grote glas.
- b** Er is meer energie nodig geweest om de grotere hoeveelheid molekulen in het grote glas dezelfde temperatuur te geven. (De hoeveelheid toegevoerde energie per molekuul is hetzelfde.)
- 7 **a** In het opslagvat met weinig water.
- b** Je hoeft het water bij gebruik weinig bij te verwarmen.
- c** Door het grotere temperatuurverschil met de omgeving zal er tijdens de opslag meer energie verloren gaan.
- 8 **a** $100 \times 4,2 = 420$ joule
- b** $100 \times 10 \times 4,2 = 4200$ joule
- c** Daartoe moet 500 g water 90 °C in temperatuur stijgen; dat kost $500 \times 90 \times 4,2 \text{ J} = 189\,000 \text{ J} = 189 \text{ kJ}$
- d** In 2 min (= 120 s) produceert de gasvlam 189 kJ energie. Het vermogen is dus: $189/120 = 1,58 \text{ kW}$.

- 1 a** Geleiding, stroming en straling.
b Bij *geleiding* blijven de molekulen op hun plaats en wordt de bewegingsenergie van molekuul naar molekuul doorgegeven.
 Bij *stroming* kunnen de molekulen zich verplaatsen. Ook hier wordt de energie door de molekulen aan elkaar doorgegeven, maar omdat zij zich nu kunnen verplaatsen gaat het sneller.
 Bij *straling* is geen tussenstof nodig. De stralingsenergie wordt door de stof geabsorbeerd en omgezet in bewegingsenergie van de molekulen.
- 2 a** Beide voorwerpen hebben dezelfde temperatuur.
b Het stuk messing.
c Omdat messing een betere geleider is dan hout zal er meer warmte van het messing naar je hand gaan dan bij het stuk hout.
- 3 a** Het stuur is van verchromd staal, de handvatten van kunststof.
b Een stalen stuur is steviger dan een van kunststof. Kunststof is een isolator; de handvatten hoeven niet zo sterk te zijn als het stuur.
- 4 a** Tussen veren en een vacht zit veel (isolerende) lucht, dat houdt de dieren beter op temperatuur.
b Geleiding (lucht, veren en wol zijn slechte geleiders) en stroming (de lucht tussen de veren en de vacht stroomt niet).
- 5 a** Glas is een slechte geleider. Zonder gaasje zou het glas plaatselijk te heet worden. Het glas zet dan boven de vlam wel uit, maar een eindje verder bijna niet. Er ontstaat dan een grote spanning in het glas, waardoor het springt.
b Kopergaas is een goede geleider: het verdeelt de warmte van de vlam, zodat het bekersglas geleidelijker verhit wordt.
- 6 a** Warm water is uitgezet t.o.v. koud water en heeft daarom een kleinere dichtheid. Het warme water blijft dus 'drijven' op het koude en dwingt het koude water in de retourleiding. Omdat het koude water zwaarder is zakt het ook makkelijker omlaag in de retourleiding.
b Het meest warme water zit bovenin en het meest koude onderin; zie blz. 233 van het leerboek, figuur 3.
c Daardoor heeft de radiator een grotere oppervlakte, waardoor hij meer straling uitzendt en meer stroming in de lucht veroorzaakt.

- 7 a** Ruiten zijn altijd kouder dan de muren. De lucht voor de ruiten zal door geleiding dus ook koud zijn. Een radiator onder het raam verwarmt die koude lucht.
b Zie figuur.



- c** Omdat verwarmde lucht lichter is, dus opstijgt.
- 8** Wit kaatst meer stralingswarmte terug. Zwart absorbeert juist stralingswarmte.
- 9** Een thermosfles isoleert goed, omdat daarbij zowel geleiding, stroming als straling zoveel mogelijk wordt tegengegaan. Dit geldt zowel voor warmte-transport van buiten naar binnen als omgekeerd. Frisdrank zal in een thermosfles dus langer koud blijven.
- 10 a** Omdat zich tussen de zon en de aarde geen lucht of andere geleidende stof bevindt. Voor stroming en geleiding zou dat noodzakelijk zijn.
b Door stroming in de atmosfeer wordt de door het aardoppervlak (vlak erboven) verwarmde lucht afgevoerd.
c De atmosfeer en de wolken voorkomen dat de aarde veel energie verliest door straling.
d Door straling.
e CO₂ is een slechte geleider en werkt zodoende als een 'deken' om de aarde.
f Hogere temperatuur van lucht en zeewater en daardoor meer smelting van poolijs: Het gevolg is hogere waterstanden in de zeeën en oceanen.
- 11 a** Een fornuis, verwarmingsapparaten, een wasmachine, een waterkoker, een koffiezetapparaat enz.
b Een koelkast en een vrieskast.
c Nee, daarvoor hebben die apparaten elektrische energie nodig.

ANTWOORDEN BLOK 7

W4

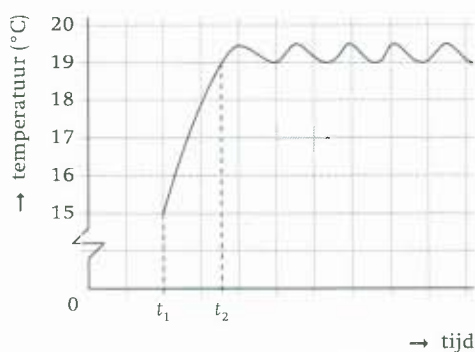
- 1**
- a** Stroming en geleiding (als het glas een sterk reflecterend oppervlak heeft óók straling).
 - b** Geleiding en stroming (van de lucht in de spouw).
 - c** Geleiding.
 - d** Straling en geleiding.
 - e** Stroming en geleiding, maar minder goed dan dubbele beglazing.
 - f** Stroming.
- 2**
- a** - Besparing door niet te hoog te stoken (warmere kleding dragen in huis) en onnodige warmteproductie te voorkomen (geen radiatoren aanzetten in ruimten waar niemand hoeft te zijn), de thermostaat tijdig lager zetten.
- Goede regeling van de temperatuurvraag (thermostaatkranen op alle radiatoren of een elektronische ontsteking (géén waakvlam nodig!) en het voorkomen van warmteverliezen door stroming of geleiding (tochtstrip, isolatie van muren, dakkap en leidingen in ruimten waar geen warmtevraag is).
- Een goede verwarmingsketel (HR- of verhoogdrendement-ketel), waardoor minder warmte verloren gaat. Effectieve benutting van de brandstof: hoog rendement.
 - b** Die uit de eerste groep: die kosten geen geld, maar alleen het kweken van goede gewoonten. Ze kunnen daarentegen véél geld besparen (en het milieu sparen).
 - c** Tussen glaswol en piepschuim zit veel lucht, die daarin niet kan stromen. Lucht is een slechte geleider.
- 3**
- a** $1800 \times f 0,50 = f 900,-$
 - b** In $12\ 000/900 = 13,3$ jaar
- 4**
- a** Dat 90 % van de bij de verbranding vrijkomende warmte in nuttige energie wordt omgezet. (10 % verdwijnt door de schoorsteen).
 - b** Chemische energie (uit de brandstof) in warmte.
 - c** Het is niet mogelijk om alle energie uit de verbrandingsgassen in nuttige energie om te zetten.
 - d** Bij een HR-ketel wordt een veel groter deel van de warmte uit de verbrandingsgasen in nuttige warmte omgezet. Dit door toepassing van twee warmtewisselaars, voorverwarming van de voor de verbranding benodigde lucht en condensatie van waterdamp uit de verbrandingsgassen (bij condensatie komt óók warmte vrij). Bovendien elektronische ontsteking (dus geen altijd brandende waakvlam).
- 5**
- a** $0,70 \times 3000 = 2100\ m^3$: bij een rendement van 100 % zou immers maar 70 % van het huidig verbruik nodig zijn.
 - b** Bij een rendement van 90 % zou nodig zijn: $100/90 \times 2100\ m^3 = 2333\ m^3$
 - c** Door de HR-ketel daalt het gasverbruik van $3000\ m^3$ naar $2333\ m^3$, een jaarlijkse besparing van $3000 - 2333 = 667\ m^3$. Dit spaart per jaar $667 \times f 0,50 = f 333,50$. Die $f 1.500,-$ worden dus terugverdiend in $1\ 500/333,5 = 4,5$ jaar.
 - d** - Minder gasverbruik spaart ook het milieu: minder schadelijke gassen in de atmosfeer.
- Als we (met velen) minder gas verbruiken, kunnen we langer toe met onze voorraad aardgas.
- 6**
- a** In een uur rijd je dan 90 km; dat kost dus $90/15 = 6$ liter benzine.
 - b** Uit figuur 30 (blz. 247 van het leerboek) blijkt dat de verbrandingswarmte van benzine 33 MJ/l is.
 - c** In 1 uur verbrandt 6 l benzine; dat levert $6 \times 33 = 198$ MJ.
 - d** Dat betekent dat 25% van de vrijgekomen warmte in nuttige energie wordt omgezet.
 - e** In een automotor wordt chemische energie (van de brandstof) omgezet in bewegingsenergie (van de motor, die dit overdraagt aan de auto).
 - f** De nuttige energie is 25% van 198 MJ = $0,25 \times 198 = 49,5$ MJ.
 - g** In de cilinders ontstaat veel wrijvingswarmte, waardoor het motorblok veel te heet zou worden (de zuigers zouden vastlopen). Daarom moet het motorblok gekoeld worden.

ANTWOORDEN BLOK 7

H1

- 1**
- a** Uit de verwarmingsketel, de meet- en regelapparatuur (thermometers, kamerthermostaat) en het transportnet met de radiatoren.
 - b** De radiatoren kunnen alleen voldoende warmte afstaan, als hun temperatuur behoorlijk hoger is dan die van de lucht in de kamer. Anders onvoldoende stroming van de lucht en straling van de radiatoren.
 - c** Voor een goede warmte-overdracht moeten de radiatoren goed geleidend zijn, dus van metaal.
 - d** Hoe groter de oppervlakte, des te meer warmte-overdracht aan de lucht door geleiding en des te meer straling de radiator uitzendt.
 - e** Door de buizen te isoleren wordt het warme water verder getransporteerd naar plaatsen waar wèl vraag naar warmte is.

- 2 a** Het ketelwater wordt naar de radiatoren gepompt; bij heter ketelwater worden die óók warmer.
- b** Hoe hoger de temperatuur van de radiator is t.o.v. de lucht in de kamer, des te beter is de warmte-overdracht.
- c** De warmtevraag is in herfst en lente kleiner. Bij een lagere ketelwatertemperatuur blijft de ketel niet zo lang branden (dus brandstofbesparing). En omdat de warmtevraag kleiner is, zal de ketel toch niet te vaak aanslaan, want het huis koelt ook minder snel af.
- d** De opwarmtijd $t_2 - t_1$ van het huis zal nu korter zijn, deze tak van de grafiek loopt nu steiler (vergeleijk leerboek blz. 235 figuur 12 a en b). Bovendien zullen alle omhoog lopende stukjes uit de 'zig-zag-grafiek' óók wat steiler verlopen. Zie figuur.



- 3 a** Op 19 °C.
- b** De radiatoren krijgen nog warm ketelwater aangevoerd; de temperatuur daarvan daalt pas als de brander enige tijd uit is.
- c** Hoe hoger de temperatuur van het huis wordt t.o.v. zijn omgeving, des te langzamer stijgt de temperatuur. Want er gaat nu ook steeds meer warmte verloren naar de omgeving.
- d** - Geleiding: door de glaswol in het radiatorfolie zal er minder warmte via de muur naar buiten gaan.
- Straling: door het aluminiumfolie op de glaswoldeken zal meer stralingswarmte van de radiator worden teruggekaatst naar de kamer.
- e** Na het aanbrengen van radiatorfolie stijgt de grafiek uit figuur 35 steiler, terwijl de (omlaag hellende) afkoelingsperioden nu iets langer duren.
- f** Het glas is een goede isolator; de lucht tussen de draden glaswol is een slechte geleider, die niet kan stromen binnen het materiaal.
- g** Op soortgelijke wijze als bij **e** is beschreven; maar spouwmuurisolatie heeft meer effect dan radiatorfolie. De muuroppervlakte is immers groter dan de oppervlakte achter de radiatoren.

- 4 a** Omdat er minder warmte naar de omgeving van het huis verdwijnt, is er minder warmte nodig om het huis op te warmen en op temperatuur te houden.
- b** Het ketelrendement wordt bepaald door het percentage nuttige energie dat de ketel uit de bij de verbranding geproduceerde warmte kan halen. Dat heeft dus niets te maken met het deel van de nuttige energie dat naar de omgeving van het huis verdwijnt.
- c** Omdat het huis sneller opwarmt en langzamer afkoelt na isolatie, zal de ketel minder vaak branden. Dat bespaart dus energie.
- 5 a** Het aanbrengen van isolatie tegen de buitenmuren van het huis, zoals radiatorfolie, spouwmuur- en dakkapisolatie en dubbel glas.
- b** Door tochtwerende maatregelen, zoals het aanbrengen van tochtstrippen.
- c** Het aluminiumfolie van radiatorfolie gaat stralingsverlies bij de radiatoren tegen.

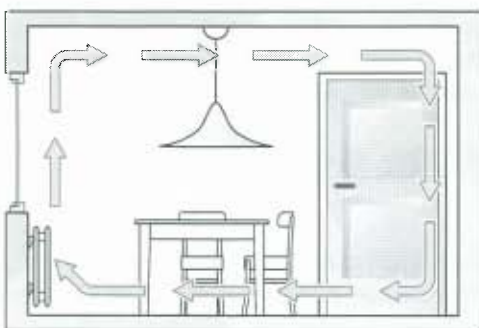
ANTWOORDEN BLOK 7

H2

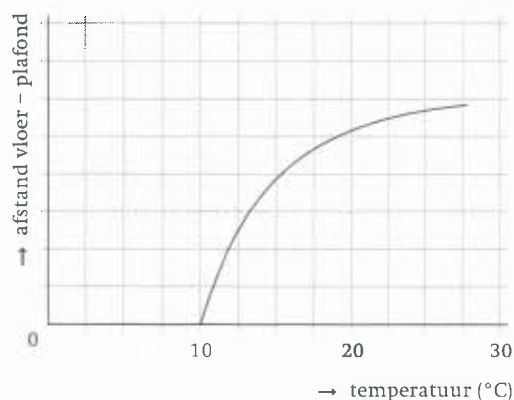
- 1 a** Geleiding, stroming en straling.
- b** Bij geleiding en stroming.
- c** Omdat de molekulen in een vaste stof wèl kunnen trillen op hun plaats, maar zich niet t.o.v. elkaar kunnen verplaatsen.
- d** De vacht bestaat uit isolerend materiaal (wol) waartussen veel lucht zit (een slechte geleider!), die binnen de vacht niet kan stromen.
- e** Omdat wind de warme lucht tussen de vacht kan doen wegstromen.
- f** Straling (de straling bestaat maar voor ca. 6 % uit zichtbaar licht en uit zeer veel IR-straling).
- 2 a** Vervang de demonteerbare zijwand van de klimaatkamer beurtelings door een wand van ander materiaal (b.v. enkel glas 3 mm, dubbel glas, triplex bekleed met radiatorfolie, aluminium plaat enz.) en verwarm telkens 10 minuten met een flinke lamp (b.v. 75 W in een kamer van 20 × 20 × 20 cm). Zorg dat de begintemperaturen van de kamer steeds (ongeveer) gelijk zijn. Maak van alle temperatuurgegevens een temperatuur-tijdgrafiek in hetzelfde diagram. Vergelijk dan de grafieken: hoe steiler de temperatuurstijging, hoe beter de isolerende werking.
- b** IJzer, koper en zink zijn geleiders, de overige materialen zijn isolatoren.
- c** Omdat die stoffen niet alleen zelf slechte geleiders zijn, maar ook veel lucht bevatten (isolator) die daarin niet kan stromen (als bij een vacht).

d - het temperatuurverschil tussen de klimaatkamer en de omgeving;
- de dikte en soort materiaal van de wanden en de demonteerbare wand.

- 3 a** Zie figuur: de warme lucht stijgt op bij de radiator, koelt bij het plafond langzaam af, zakt aan de andere kant van de kamer omlaag en beweegt langs de grond weer richting radiator ('aanzuiging' door de lucht die daar omhoogstroomt).



b Zie figuur.



c In figuur 40 (blz. 253 leerboek) treedt geen stroming op, als het verwarmingselement bovenin zit; het warme water blijft boven, het koudere beneden.

d Er is geen stroming, en water is een slechte geleider.

e Pas dan kan het (lichtere) warme water van onder uit het aquarium naar boven stromen en zal daar na afkoeling weer omlaag zakken enzovoort. (Vergelijk situatie in de figuur bij **a**.)

- 4 a** De warme koffie stijgt omhoog en blijft daar (in thermosfles geen warmtetransport naar buiten). Het tweede kopje koffie zal dus koudere koffie bevatten.
b Koffiemelk is zwaarder dan koffie: grotere dichtheid en kouder.
c Door eerst koffiemelk in de lege koffiekop te schenken en daarop koffie te schenken.

5 a Omdat warme lucht lichter is dan koude lucht, en dus omhoogstijgt.

b Omdat nu de vloer verwarmd wordt, zal de lucht langs de vloer door geleiding opwarmen en dan opstijgen. Er ontstaat zo een gelijkmatiger verwarming dan bij het stromingspatroon als in de figuur bij vraag **3a**.

6 a Door straling en geleiding van de warme lucht boven het water warmt de bovenste laag water op. Dit warmere water is lichter en blijft dus boven. Omdat water een slechte geleider is, zal het water in de diepte koud blijven (er dringt óók weinig stralingsenergie van de zon door).

b De waterlaag onder het oppervlak wordt verwarmd door geleiding van de bovenste warme laag en door absorptie van zonnestraling, die daar kan doordringen.

c Het bovenste zand wordt heet door absorptie van zonnestraling, maar zand is een slechte warmtegeleider. Iets dieper blijft het zand dus koud.

d Omdat het nog vochtig is van de vloed die geweest is. En water heeft een véél grotere soortelijke warmte dan (droog) zand.

7 a Door de radiator een grote oppervlakte te geven (rillen in de plaat geperst en twee of meer radiatorplaten per radiator achter elkaar plaatsen met lamellen ertussen).

b De stroming van de door de radiator verwarmde lucht (de straling óók).

c Door straling en stroming van de warme lucht.

d Door geleiding van de radiatorplaat naar je hand en door straling.

e Er kan nu geen geleiding optreden (lucht is een slechte geleider) en nauwelijks stroming. Toch voel je 'warmte'; dat kan alleen maar straling zijn.

8 a Wit absorbeert weinig straling en kaatst veel warmtestraling terug.

b Anders wordt het in de auto veel te heet; mensen en kunststofmaterialen kunnen daar slecht tegen.

c Het scherm weert veel stralingswarmte naar het interieur.

d Omdat de warme lucht in de auto niet door stroming weg kan.

e Wol is een isolator, en zal dus in de zon geen hoge temperatuur krijgen. Donker leer wordt wél heet.

f Omdat de hitte van het metaal goed de warmte naar je hand geleidt.

ANTWOORDEN BLOK 7

H3

- a** Dat bij verbranding van 1 kg steenkool 29 MJ warmte vrijkomt.
b $12 \times 29 \text{ MJ} = 348 \text{ MJ}$
c $50/1000 \times 29 \text{ MJ} = 1,45 \text{ MJ}$
- a** Per uur komt vrij: $8 \times 33 \text{ MJ} = 264 \text{ MJ}$
b $50 \times 33 \text{ MJ} = 1650 \text{ MJ}$
- a** Omzetting van chemische energie (brandstof) in bewegingsenergie.
b Als het rendement $\frac{1}{4}$ is betekent dat: 1/4de deel van alle vrijkomende energie wordt omgezet in nuttige energie (hier: de energie die nodig is om de auto te laten rijden).
c Dat is een rendement van $\frac{1}{4} \times 100 \% = 25 \%$.
- a** Dat 40 % van de vrijkomende warmte bij de verbranding van het gas wordt omgezet in elektrische energie.
b Die verdwijnt als stralingsenergie, bij de wrijving (dynamo) maar vooral in het opgewarmde koelwater.
c Bij een rendement van 40 % levert de centrale per seconde $0,40 \times 600 = 240 \text{ MJ}$.
- rendement = $40/50 \times 100 \% = 80 \%$
- a** elektrische energie \rightarrow stralingsenergie en warmte
b 40 W betekent: 40 J per seconde.
c Bij een rendement van 5 %: $0,05 \times 40 = 2,0 \text{ J}$ (zichtbare) stralingsenergie.
- De benzine levert per uur 33 MJ. De motor levert daaruit 6,6 MJ nuttige energie. Dus het rendement is $6,6/33 \times 100 \% = 20 \%$.

ANTWOORDEN BLOK 7

E1

- Ja, beide gelijke hoeveelheden water delen hun gezamenlijke energie.
- Bij het aan de kook brengen van 1 l water. Want bij de verwarming tot 100 °C wordt de temperatuur hoger dan bij de verwarming tot 60 °C; daardoor wordt bij verhitting tot 100 °C meer energie aan de omgeving afgestaan. Hoe groter het temperatuurverschil tussen water en omgeving, des te meer warmte aan de omgeving wordt afgestaan.

- Benodigd: pan met 2 l water van 20 °C; eenzelfde pan met 1 l water van 20 °C.
Verder: campinggasbrandertje: stopwatch en thermometer.
Weeg het gastankje telkens vóór de proef en erna. Je weet dan hoeveel gas verbruikt is.
Bepaal hoeveel gas nodig is om 2 l water van 20 °C te verwarmen tot 60 °C. Met de verbrandingswarmte van butaan is die hoeveelheid gas in J om te rekenen.
Bepaal hoeveel gas nodig is om 1 l water van 20 °C te verwarmen tot 100 °C en reken ook dit om in J. (Je kunt ook volstaan met het vergelijken van beide hoeveelheden verbruikt butaangas.)

ANTWOORDEN BLOK 7

E2

- a** Wanden, ruiten, deuren, vloer en plafond.
b Bovengenoemde delen moeten óók in de gemeubeleerde kamer worden verwarmd, maar bovendien de meubels en gordijnen, enz. Daarvoor is dus altijd méér energie nodig.
c joule per °C (J/°C). (Niet 'per kg', want het gaat om verwarming van de hele kamer)
- a** De temperatuur stijgt geleidelijk, en hoe hoger de temperatuur wordt t.o.v. die van de omgeving van het huis, hoe meer warmte weer aan de omgeving wordt afgestaan. Daarom verloopt de temperatuurstijging steeds langzamer.
b De 'aanloop-grafiek' zou een rechte worden volgens de richting van de raaklijn aan de grafiek op $t = 0 \text{ min}$. En de 'zig-zag' uit de grafiek zou verdwijnen. De grafiek zou bij 19,7 °C horizontaal gaan lopen.
c Als je op $t = 0 \text{ min}$ de raaklijn trekt, kun je in de grafiek aflezen dat de temperatuur dan in 14 min zou zijn gestegen van 15 °C naar 20 °C. Dus de stijging per minuut zou dan zijn geweest: $(20 - 15) \text{ °C}/14 \text{ min} = 0,36 \text{ °C}/\text{min}$
- a** Per seconde levert de ketel 15 kJ energie, dus per minuut: $60 \times 15 = 900 \text{ kJ}$
b De warmtecapaciteit K van het huis is de energie Q die nodig is om het hele huis 1 °C te verwarmen (als er geen warmte aan de omgeving zou worden afgestaan).
 $K = Q/\Delta t = (900 \text{ kJ}/\text{min}) / (0,36 \text{ °C}/\text{min}) = 2500 \text{ kJ}/\text{°C} = 2,5 \text{ MJ}/\text{°C}$.
- Uit de raaklijn aan de grafiek op $t=0 \text{ min}$ is af te lezen: de temperatuur stijgt $(40 - 20) \text{ °C}$ in 2,5 min, dus de temperatuurstijging per minuut = $20/2,5 = 8,0 \text{ °C}$ (als er geen uitstraling zou zijn).
De lamp van 60 W levert $60 \text{ J}/\text{s} = 3600 \text{ J}/\text{min}$.
Dus de warmtecapaciteit
 $K = (3600 \text{ J}/\text{min}) / (8,0 \text{ °C}/\text{min}) = 450 \text{ J}/\text{°C}$.

- 5 a** Als de warmtecapaciteit van het huis groter is, zal het langer duren voor de gevraagde temperatuur is bereikt, want de ketel geeft per minuut evenveel energie als eerst. De grafiek in figuur 43 (blz. 257 leerboek) zal dan langzamer stijgen naar de ingestelde temperatuur.
- b** Als het huis slechter geïsoleerd is, zal er tijdens het opwarmen meer energie naar de omgeving verdwijnen. De grafiek in figuur 43 (blz. 257 leerboek) zal dan óók langzamer stijgen naar de ingestelde temperatuur. Je krijgt dan een soortgelijke grafiek als bij vraag **a**.

- 6 a** Met figuur 45 (blz. 258 leerboek) vind je voor het warmteverlies per seconde:

– bij 17 m² dubbel glas: $17 \times 3,0 = 51 \text{ J/s}$

– bij 110 m²

geïsoleerde spouwmuur: $110 \times 0,8 = 88 \text{ J/s}$

– bij 100 m²

geïsoleerd pannendak: $100 \times 0,6 = 60 \text{ J/s}$

– bij 70 m²

geïsoleerde betonvloer: $70 \times 0,9 = 63 \text{ J/s}$

totaal: $262 \text{ J/s} = 262 \text{ W}$

b Dit gegeven is te weinig om het vermogen van de ketel te kunnen kiezen. Daarvoor moeten veel meer gegevens over het huis beschikbaar zijn, zoals het aantal en de grootte van de kamers, de in de diverse kamers gewenste temperaturen, de warmtecapaciteit van het huis, enz.

Hooguit kun je zeggen dat het vermogen van de ketel natuurlijk groter moet zijn dan het vermogen dat door warmteverlies verloren gaat, dus zeker hoger dan $45 \times 262 \text{ W} = 11,8 \text{ kW}$.

- 2 a** $100 - 10 = 90 \text{ }^\circ\text{C}$

b Uit figuur 30 blz. 247 van het leerboek: verbrandingswarmte aardgas = 33 MJ/m^3 . Dus bij $0,015 \text{ m}^3$ komt vrij:

$0,015 \times 33 = 0,50 \text{ MJ}$.

c In de hete verbrandingsgassen en voor verwarming van de ketel zelf.

d Uit **a** en **b** blijkt dat er 0,50 MJ nodig is om de ketel met water $90 \text{ }^\circ\text{C}$ te verwarmen, dus om de ketel met water $1 \text{ }^\circ\text{C}$ te verwarmen is nodig: $500 \text{ kJ}/90 \text{ }^\circ\text{C} = 5,6 \text{ kJ}/^\circ\text{C}$.

- 3 a** Chemische energie in elektrische energie.

b Per seconde verbrandt 40 m^3 aardgas. Met figuur 30 blz. 247 van het leerboek: Per seconde ontstaat $40 \times 33 \text{ MJ} = 1320 \text{ MJ}$ warmte.

c De per seconde nuttig geleverde energie is 500 MJ , het rendement is $500/1320 \times 100 \% = 38 \%$.

d Soortelijke warmte van water is $4,18 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$. De massa van 40 m^3 water is $40 \times 1000 = 40\,000 \text{ kg}$. Om van 20 naar $25 \text{ }^\circ\text{C}$ te verwarmen is nodig: $40\,000 \times 4,18 \times 5 \text{ kJ} = 836\,000 \text{ kJ}$; dit wordt per seconde opgenomen.

e Voor één huis is nodig: 20 kJ/s , dus met dat koelwater kun je $836\,000/20 = 41\,800$ huizen verwarmen.

f – Het bespaart een geweldige hoeveelheid brandstof.

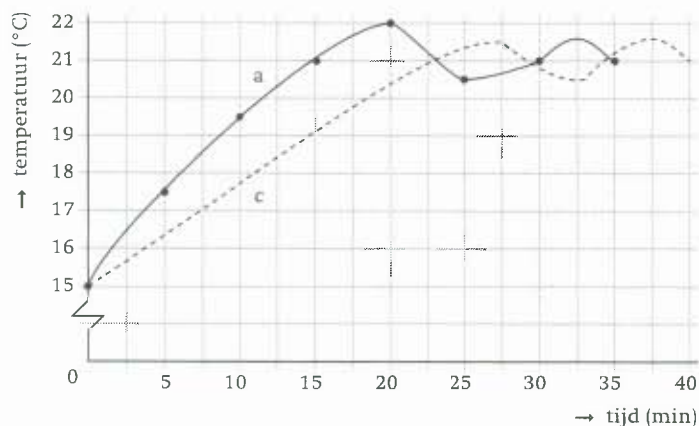
– de verkregen warmte is ‘gratis’, maar geïsoleerde leidingen naar huizen en meters om het warmteverbruik te meten eisen natuurlijk wel een grote investering.

– Het is goed voor het milieu: er komen veel minder schadelijke gassen in de atmosfeer. Bovendien zal het (anders geloosde) warme koelwater nu ook geen algengroei veroorzaken.

ANTWOORDEN BLOK 7

E3

- 1 a** Zie figuur (lijn a).



b Uit het temperatuurverloop tussen 25 en 35 min blijkt dat de ketel weer gaat branden, als de temperatuur gedaald is tot $20,5 \text{ }^\circ\text{C}$. Bij het opwarmen schiet de temperatuur door naar $22 \text{ }^\circ\text{C}$. Het lijkt er dus op dat de ketelwatertemperatuur te hoog is afgesteld voor het jaargetijde.

c Zie figuur (lijn c).

- 4 a** Geen geleiding, want wanden en deksel van de doos zijn van dubbelwandige kunststof met een isoleerlaag ertussen.
Geen stroming, want de (goed gevulde) doos is afgesloten door een isolerend deksel.
- b** Door in de vriezer te controleren of de vloeistof in de koelelementen niet bij 0 °C, maar pas bij een veel lagere temperatuur vast wordt.
- c** Omdat voor een fase-overgang van vast naar vloeibaar een grote smeltwarmte nodig is. Die smeltwarmte zal door ingestraalde warmte geleverd moeten worden. Dus de koelelementen houden de inhoud van de doos heel lang koel.
- 5 a** De zon verwarmt de aarde, maar de atmosfeer neemt bijna geen energie op uit de warmtestraling. (Op grote hoogte heersen lage temperaturen.) De warme aarde verwarmt de lucht die met de aarde in contact is. Die lucht zal dus opstijgen, wat de thermiek levert.
- b** Geleiding bij de verwarming door het aardoppervlak en stroming bij de thermiek.
- c** Op grotere hoogte daalt de temperatuur. De waterdamp in de lucht zal daardoor bij een bepaalde temperatuur verzadigd raken (bij het 'dauwpunt') en bij verdere afkoeling condenseren. Er ontstaan wolken.
- d** Bij condensatie komt veel warmte vrij. Die op grote hoogte vrijkomende warmte is daar (via de waterdamp) naar toe getransporteerd.
- 6 a** Die 1,5 l water moet $(100 - 20) = 80$ °C in temperatuur stijgen. Er is dus nodig:
 $1,5 \times 4200 \times 80 \text{ J} = 504\,000 \text{ J} = 504 \text{ kJ}$.
- b** Als de pompelaar 900 J/s zou leveren duurt dat $504 \cdot 10^3 / 900 \text{ s} = 560 \text{ s} =$ ruim 9 minuten.
- c** De gasvlam levert per seconde maar 1650 J nuttige energie, dus dat duurt:
 $504 \cdot 10^3 / 1650 \text{ s} = 305 \text{ s}$ is ca. 5 minuten.
- 7 a** Warm geworden lucht in de kist stijgt op en wordt door A weer afgekoeld. De koude lucht zakt dan weer omlaag.
- b** Een koelelement onderin houdt de lucht daar koud, zodat die lucht niet gaat stromen.
- c** Als je iets uit een diepvrieskist pakt, blijft de koude lucht in de kist. Bij een kast met deur 'valt' de koude lucht onder uit de kast, zodat er weer extra energie nodig is om de vraagtemperatuur te bereiken. Er zal immers weer wat warme lucht in de kast gekomen zijn, toen er koude lucht uitging.

J. VAN RIET
Pieter Nieuwland College, Amsterdam

Een tweede-orde klimaatkamer in de klas

Aan een klimaatkamer, voorzien van lamp en temperatuurvoeler, is interessant onderzoek te verrichten.

Welk model beschrijft het temperatuurverloop in de kamer?

Wat zijn de effecten van isolatie?

Hoe kunnen we in de klas in zo kort mogelijke tijd zo goed mogelijke meetresultaten bereiken?

Verslag van een voor mij boeiende ontdekkingsreis.

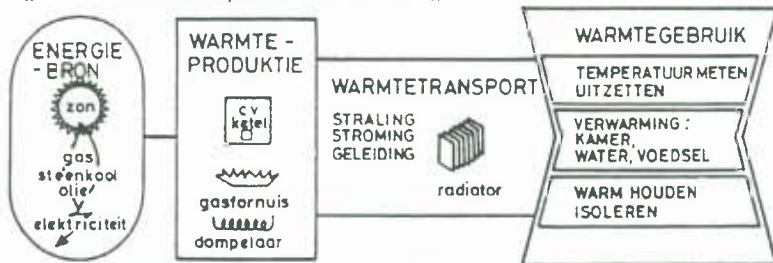
Het WEN-programma schrijft veel onderwerpen in context voor. In deze zin wordt de DBK-bovenbouwmethode herzien.¹ Het blok „Warmte in huis” voor klas 4 H/V heeft als centrale context de centrale verwarming. Aan de hand van het schema in figuur 1 komen begrippen als rendement, transport, soortelijke warmte en isolatie aan de orde. Om het effect van isolatie te onderzoeken heeft de TOA twee klimaatkamers gebouwd: een „grote kamer” van 50 bij 30 bij 30 cm en een „kleine kamer” van 22 bij 17 bij 16 cm, beide bestaande uit 8 mm dik triplex. Een grote zijwand is demonteerbaar en kan bestaan uit triplex, enkel glas (3 mm), dubbel glas (spouw 6 mm) en enkel glas met „gordijn”.

De kamer werd uitgerust met een gloeilamp en enkele temperatuurvoelers, verbonden met een digitale uitlezing.² In de beginfase van mijn metingen verscheen een artikel van Klaas Berends³ over dit onderwerp. Dit inspireerde mij tot uitgebreid onderzoek, hetgeen verderop leidt tot een kritische beschouwing van zijn meetresultaten.

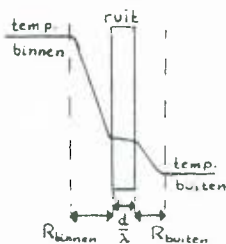
De k-waarde

In tabel 10 van het Binasboek staat de

Figuur 1 Schematische opzet van het DBK-blok „Warmte in huis”



warmte-geleidingscoëfficiënt λ van vaste stoffen in het algemeen en van bouw- en isolatiematerialen in het bijzonder vermeld. Deze coëfficiënt is niet geschikt om het effect van isolatie te bepalen. Dit komt doordat de warmteweerstand van de luchtlagen aan de binnenkant en de buitenkant van het materiaal een grote rol speelt. Voor 6 mm dik glas (figuur 2) leveren de luchtlagen ongeveer 96 % van de totale warmteweerstand.



Figuur 2 Warmteweerstand

Dit is als volgt na te gaan:

$$R_{\text{glas}} = d/\lambda = 6,45 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2\text{KW}^{-1}$$

In het normblad NEN 1068 is de aanbevolen waarde voor $R_{\text{binnen}} = 0,13 \text{ m}^2\text{KW}^{-1}$ en voor $R_{\text{buiten}} = 0,04 \text{ m}^2\text{KW}^{-1}$ (vanwege de invloed van vocht en wind).

$$R_{\text{totaal}} = R_{\text{binnen}} + R_{\text{glas}} + R_{\text{buiten}} = 0,18 \text{ m}^2\text{KW}^{-1}$$

De k -waarde is de reciproke waarde van R_{totaal} :

$$k = 1/R_{\text{totaal}} \text{ in } \text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$$

en geeft dus het warmtetransport per seconde door 1 m^2 van het materiaal bij een temperatuurverschil van 1 K tussen binnen en buiten. Op bovenstaande manier berekend, is de k -waarde van de 6 mm dikke ruit $5,7 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ en van 8 mm dik triplex ($\lambda = 0,17 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$) $4,6 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$.

Bekleedt men de klimaatkamer met 8 mm dik zachtboard, dan wordt de k -waarde $3,2 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ en met 5 cm glaswol ($R = 0,25 \text{ m}^2\text{KW}^{-1}$ per cm) daalt de k -waarde tot $0,68 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$.

De experimentele k -waarde van de gebruikte kamers, bekleed met radiatorfolie, is $2,4 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$. Zie verder de tabel in figuur 3.

	k ($\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$)
dubbel glas	2,8
spouwmuur	1,8
id. met isolatie	0,8
pannendak	2,0
id. met isolatie	0,4
NMB-hoofdkantoor	0,35 (!)
Pieter Nieuwland College ⁴	3,66
goed geïsol. huis	0,7-1,2

Figuur 3. k -waarden

In Nederland wordt de vuistregel gehanteerd dat per m^2 wand met k -waarde k in een stookseizoen $10 \cdot k \text{ m}^3$ aardgas verstoekt wordt bij een binnentemperatuur van $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Vervangt men in de woonkamer enkel glas door dubbelglas dan bespaart dit ongeveer 30 m^3 aardgas per m^2 glas.

Op zoek naar een model

Om het effect van isolatie aan leerlingen te tonen, is het niet nodig om de klimaatkamer te verwarmen tot de eindtemperatuur bereikt is; zie de grafieken in figuur 14. Leerlingen willen die eindtemperatuur echter graag zien en bovendien is hieruit gemakkelijk de k -waarde van de kamer te bepalen. Vanwege de praktische uitvoerbaarheid van de proef was ik geïnteresseerd bij welk lampvermogen en bij welke afmetingen en materialen van de klimaatkamer de eindtemperatuur het snelst bereikt werd. Na enig vruchteloos geëxperimenteer (het duurde uren!) ging ik op zoek naar een model dat mij de temperatuur als functie van de tijd moest leveren.

De energie van de lamp wordt deels gebruikt voor het verwarmen van de lucht en de wanden van de kamer; de rest wordt naar buiten getransporteerd. Hiervoor geldt:

$$P_{\text{lamp}} = \frac{dQ}{dt} = C \frac{dT}{dt} + kAT \quad (1)$$

met C = warmtecapaciteit van de kamer; de bijdrage van de lucht hieraan is vrijwel te verwaarlozen

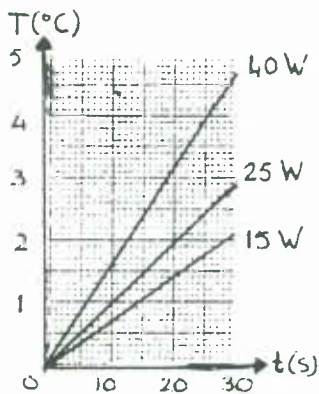
$$T = T_{\text{kamer}} - T_{\text{buiten}} \text{ (op de kamertemperatuur kom ik aan het eind van het artikel terug)}$$

A = oppervlakte van de kamerwanden.

In het begin van de proef is het transport naar buiten te verwaarlozen, dus dan

$$P = C dT/dt$$

en de temperatuur stijgt lineair (figuur 4; hieruit is C te bepalen).



Figuur 4 Lineair temperatuurverloop in de kleine kamer

Deze relatie is overigens beter bekend als $Q = mc\Delta T$. Als de eindtemperatuur $T(e)$ bereikt is ($dT/dt = 0$) geldt $P = kAT(e)$, waaruit de k -waarde van de kamer volgt. We herschrijven (1) als

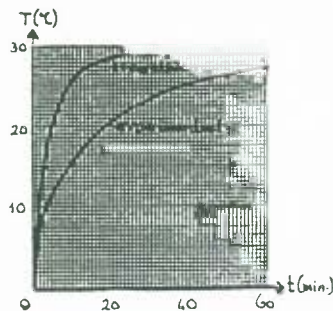
$$\frac{dT}{dt} + \frac{kA}{C} T = \frac{P}{C}$$

Voor constante k , A , C en P heeft deze differentiaalvergelijking als oplossing:

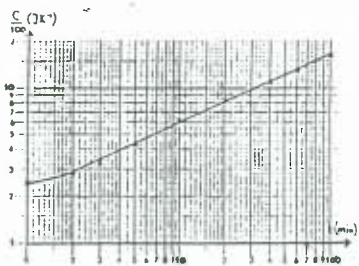
$$T(t) = \frac{P}{kA} \left(1 - e^{-\frac{kAT}{C}} \right) \quad (2)$$

Hieruit blijkt: $T(e) = P/kA$ als $t = [\text{oneindig}]$. Niet erg bruikbaar voor mijn doel dus.

In figuur 5 is het temperatuurverloop volgens (2) vergeleken met de experimentele situatie. De kamer warmt in de praktijk langzamer op. Dit komt doordat een steeds groter deel van de wanden op een hogere temperatuur gebracht wordt. De „effectieve” warmtecapaciteit neemt toe (figuur 6).



Figuur 5 Theoretisch en experimenteel temperatuurverloop in de grote kamer bij 100 W



Figuur 6 Warmtecapaciteit van de kleine kamer, berekend met (2)

In de differentiaalvergelijking is C dus niet constant, hetgeen de oplossing $T(t)$ wel zeer ingewikkeld maakt.⁵ De grootheid C/kA heeft als eenheid de seconde, en wordt de tijdconstante τ genoemd; (2) wordt meestal geschreven als

$$T(t) = T(e) \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right)$$

De tijdconstante is een materiaalconstante:

$$\tau = \frac{C}{kA} = \frac{\rho c d}{k} \quad (3)$$

met c = soortelijke warmte
 d = dikte materiaal.

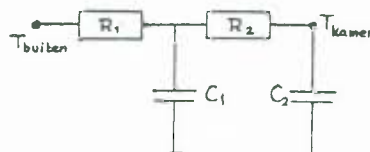
Hoe „zwaarder” de constructie is en hoe beter geïsoleerd, des te groter is de tijdconstante, zie de tabel in figuur 7.⁶ Overigens heeft het nauwelijks zin om met deze tijdconstante te rekenen (maar toch gebeurt het!⁷), omdat de praktijk een afwijkend beeld geeft, zoals hierboven vermeld. Op zoek naar een beter model dus.⁸

	τ (h)
kleine klimaatkamer	0,45
grote klimaatkamer	0,57
matig geïsol. woning	24-48
goed geïsol. appartement	50-100

Figuur 7. Tijdconstantes

Sinds het begin van de jaren tachtig bestaat zo'n model.⁹ Het gaat in eerste orde

uit van een warmteverstand en een warmtecapaciteit in serie. Vaak gedraagt een ruimte zich als tweede-orde-systeem, dat beschreven wordt met 2 warmteverstanden en 2 warmtecapaciteiten, volgens het „schakelschema” van figuur 8.



Figuur 8 Tweede-orde-systeem

Het temperatuurgedrag van een tweede-orde-systeem wordt beschreven met 3 tijdconstantes τ_0 , τ_1 en τ_2 :

$$\tau_0 = R_1 C_1 = \frac{C}{kA}$$

bij het begin van het opwarmproces (figuur 9)

$$\tau_1 = \frac{2b}{a - a^2 - 4b} = \frac{C}{kA}$$

tijdens het laatste deel van het opwarmproces (figuur 9)

$$\tau_2 = \frac{2b}{a + a^2 - 4b}$$

met $a = R_1 C_1 + R_1 C_2 + R_2 C_2$ en $b = R_1 R_2 C_1 C_2$.

(2) gaat dan over in

$$T(t) = \frac{P}{kA} \left(1 - A e^{-\frac{t}{\tau_1}} - B e^{-\frac{t}{\tau_2}} \right) \quad (4)$$

met $A = \frac{\tau_1 (\tau_0 - \tau_2)}{\tau_0 (\tau_1 - \tau_2)}$ en $B = \frac{\tau_2 (\tau_1 - \tau_0)}{\tau_0 (\tau_1 - \tau_2)}$

De waarde van de constanten τ_0 , τ_1 en τ_2 worden bepaald uit het $\log T/T(0)$ - t -diagram bij afkoeling volgens figuur 9. Op deze wijze vond ik als gemiddelde voor de triplex klimaatkamer: $\tau_0 = 2,6 \cdot 10^2$ s, $\tau_1 = 1,6 \cdot 10^3$ s, $\tau_2 = 1,4 \cdot 10^2$ s.

(Ter controle: $\tau_0 = C/kA$ bij het begin van het opwarmproces, dus te vinden uit



τ_0 = steilheid grafiek voor $t = 0$
 τ_1 = steilheid van het laatste rechte stuk
 τ_2 = steilheid van de grafiek ΔT

Figuur 9 Bepaling tijdconstantes

de steilheid van de T - t -grafiek in figuur 4; het gemiddelde hiervan blijkt $2,5 \cdot 10^2$ s te zijn.) Hieruit volgt:

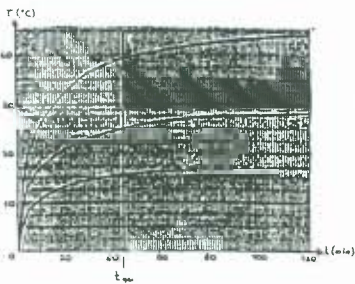
$$A = 0,5 \text{ en } B = 0,5.$$

(4) wordt dan:

$$T(t) = \frac{P}{kA} \left(1 - 0,5 e^{-\frac{t}{\tau_1}} - 0,5 e^{-\frac{t}{\tau_2}} \right) \quad (5)$$

Een tweede-orde-kamer

Uit de afkoelingskrommen in figuur 9 bleek dat ik in het bezit was van een tweede-orde-kamer. Dan moeten de experimentele waarden van $T(t)$ bij het opwarmen beschreven worden met (5). Om dit te controleren moest ik eerst de k -waarde bepalen uit $P = kAT(e)$. Daartoe heb ik de kleine kamer opgewarmd met een lamp van resp. 15 W, 25 W en 40 W (figuur 10). Vanwege het asymptotisch verloop van de temperatuur, was het moeilijk na te gaan wanneer precies de eindtemperatuur bereikt werd; theoretisch duurt dit trouwens oneindig lang. Na enkele uren ging de temperatuur lichtelijk schommelen rond een evenwichtswaarde. (Uit (5) volgt dat de eindtemperatuur op 0,1 graad na bereikt wordt na 1,8 uur (bij 15 W) à 2,5 uur (bij 40 W)). De met deze temperatuur berekende k -waarde is voor beide triplex kamers $4,4 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$, hetgeen goed overeenkomt met de berekende waarde van $4,6 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$.

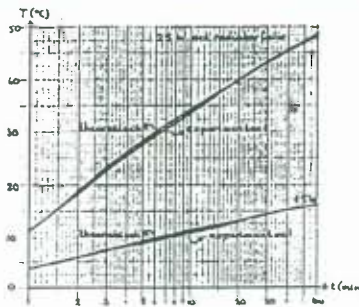


Figuur 10
Temperatuurverloop in de kleine kamer

Nu kon ik $T(t)$ berekenen met (5). De resultaten in figuur 11 bevestigen het tweede-orde-model!

Opwarmen in de klas

Met dit model werd het mogelijk om een antwoord te vinden op de vraag: bij welk lampvermogen en bij welke afmetingen en materialen van de klimaatkamer wordt de eindtemperatuur het snelst bereikt? Omdat dit dus niet lukte via berekening van het moment waarop $T(e)$ bereikt werd, heb ik gekozen voor het volgende



Figuur 11
Theoretisch (met het „nieuwe model”) en experimenteel temperatuurverloop in de kleine kamer

criterium: op welk moment is de temperatuur 90 % van de eindtemperatuur? Dit tijdstip noem ik de opwarmtijd $t(90)$. Ik ga uit van (5). Uit $t(90) = 0,9 T(e) = 0,9 P/kA$ en

$$t(90) \gg T_2 \rightarrow e^{-\frac{t(90)}{\tau_2}} = 0$$

(deze term verdwijnt na ongeveer 20 minuten) volgt:

$$e^{-\frac{t(90)}{\tau_1}} = 0,2 \rightarrow t(90) = 1,6 \tau_1 = 1,6 \frac{\rho c d}{k} \quad (6)$$

Voor $\tau_1 = 1650$ s : $t(90) = 44$ minuten, hetgeen in overeenstemming is met de experimenten (figuur 10). Uit (6) blijkt dat de opwarmtijd $t(90)$ onafhankelijk is van het vermogen van de lamp en de grootte van de kamer en uitsluitend bepaald wordt door de eigenschappen van het kamermateriaal! Dit resultaat wordt wellicht wat minder spectaculair als ik in herinnering breng dat de warmtecapaciteit van de lucht in de kamer te verwaarlozen is. Om binnen één lesuur de eindtemperatuur (min of meer) te bereiken, moest ik een kamer bouwen waarvoor $\rho c d/k$ klein is.

Raadpleging van het Binasboek levert als mogelijkheden: asbest (kankerverwekkend), karton (papier) en blik (ijzer). Voor een kartonnen doos blijkt $t(90) = 25$ minuten en voor een blikken bus blijkt $t(90) = 16$ minuten te zijn. De eindtemperatuur in de bus (met een lamp van 25 W) wordt na ongeveer 40 minuten, dus binnen een lesuur, bereikt.

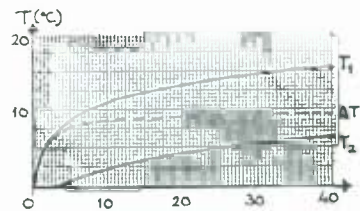
De metingen van Berends

Experimenteel en theoretisch blijkt dus dat een triplex kamer na ongeveer twee uur bijna de eindtemperatuur bereikt heeft.

De grafiek in Berends' artikel leert echter dat hij reeds na ruim een half uur zo ver is. Hoe kan dat?

Wel, hij heeft de buitentemperatuur op het isolatiemateriaal gemeten (hij vermeldt eerder: „vlak voor het huis”). Deze methode is niet juist. In de formules staat altijd het verschil tussen de temperatuur binnen en de temperatuur van de lucht buiten. Ter illustratie: uit Berends' eindtemperatuur van de triplex kamer volgt een k -waarde van maar liefst $7,6 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$.

Ter controle heb ik deze metingen ook verricht. Uit figuur 12 blijkt dat het verschil tussen de binnentemperatuur en de oppervlaktetemperatuur buiten inderdaad na 30 à 40 minuten constant blijft. Dit geldt voor alle lampvermogens. De oorzaak is (uiteraard) dat de wand vertraagd opwarmt.



$$T_1 = T_{\text{binnen}} - T_{\text{buitenlucht}}$$

$$T_2 = T_{\text{buitenwand}} - T_{\text{buitenlucht}}$$

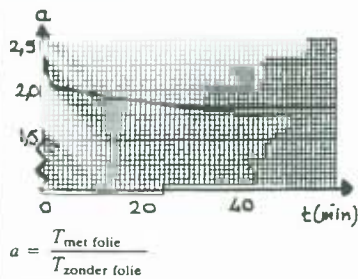
$$\Delta T = T_1 - T_2$$

Figuur 12
Kleine kamer bij 15 W

Pas na 2 (bij 40 W) à 3 (bij 15 W) minuten begint de buitenkant van de wand merkbaar in temperatuur te stijgen; na ruim een half uur is deze stijging even groot als de temperatuurstijging binnen, hetgeen het horizontale verloop van Berends' grafieken verklaart. Dat neemt niet weg, dat zijn metingen een goede indruk geven van het effect van isolatie.

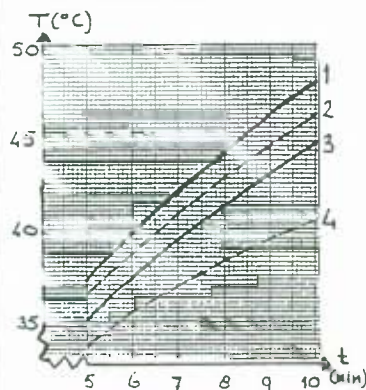
Het effect van isolatie

Hierom was het uiteindelijk begonnen. De verschillen in temperatuurverloop bij diverse (isolatie)materialen ziet u uiteraard het beste en het snelste in een kleine, goed geïsoleerde kamer met groot lampvermogen. Volgens (5) geldt immers op een bepaald tijdstip: T is evenredig met P/kA bij bepaalde tijdconstantes. De waarden hiervan voor een triplex kamer met en zonder radiatorfolie verschillen niet veel. Met radiatorfolie verloopt alleen in het begin de temperatuur anders (τ_0 is kleiner). Zie figuur 13. Door de triplex wanden met radiatorfolie te bekleden, daalde de k -waarde van de kamer van $4,4$ tot $2,4 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$. Een collega heeft dit effect in de klas laten



Figuur 13
Kleine kamer, 25 W

zien met een dunne aluminium plaat (een goede geleider toch?) als zijwand. De temperatuur steeg, tot verbazing van de leerlingen, zeer sterk!
Omdat Berends al het effect van triplex en een „gordijn” heeft laten zien, beperk ik mij tot het vergelijken van enkel (3 mm) met dubbel glas (spouw 6 mm). Om historische redenen heb ik deze metingen het meest uitgebreid gedaan in de grote van radiatorfolie voorziene kamer met een lamp van 300 W. Dit is te vergelijken met 75 W in de kleine kamer en 125 W in de kamer van Berends. De resultaten staan in figuur 14.



1: dubbel glas, 2: met föhn, 3: enkel glas, 4: met föhn

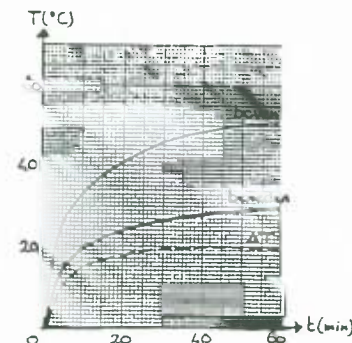
Figuur 14
Grote kamer, 300 W

Wat is het effect van wind? Hiertoe heb ik een föhn koude lucht onder een hoek van 45° midden op de ruiten laten blazen. U dient erop bedacht te zijn dat de temperatuur van de „koude” lucht meestal hoger is dan de begintemperatuur van de kamer. Dus eerst de föhn aanzetten en wachten tot de temperatuur gestabiliseerd is. Uit figuur 14 blijkt dat de wind minder „vat” heeft op de dubbele ruit, hetgeen te verwachten was.

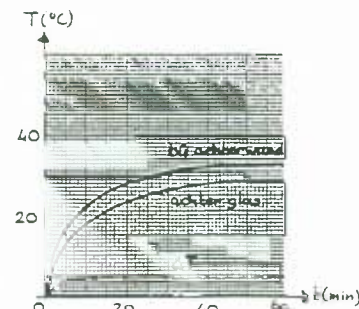
Conclusies en praktische aanwijzingen

De plaats in de kamer waar de tempera-

tuur gemeten wordt, is van groot belang. Er is een groot temperatuurverschil tussen boven en beneden (figuur 15) en tussen een plaats vlak bij de achterwand en vlak achter glas (figuur 16). In de

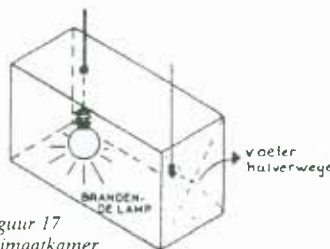


Figuur 15
Kleine kamer, 25 W



Figuur 16
Kleine kamer, 40 W, enkel glas

praktijk worden temperaturen op halve kamerhoogte gemeten.¹⁰ Om een „gemiddelde” temperatuur te meten, lijkt de plaats van de voeler in figuur 17 een goede keus.



Figuur 17
Klimaatkamer

De opstelling is niet erg gevoelig voor het klimaat in het lokaal. Een leerling mag tijdens het experiment gerust naar het toilet of een raam openzetten. Hoed u echter wel voor overmatige ventilatie of sterke instraling van de zon. Het te onderzoeken materiaal hoeft niet absoluut kiervrij aan de kamer bevestigd te worden, maar ook hier geldt: overdaad schaadt.

Na een meting waarbij de temperatuur flink gestegen is, moet de kamer minstens een half uur afkoelen; de wanden

en de fitting geven nog lang warmte af. Op deze manier kan per les slechts één materiaal onderzocht worden. Met 3 of 4 kamers, voorzien van verschillende materialen, bent u in één les, ja zelfs in 10 minuten, van alles af. Als u het bovenstaande in acht neemt, zijn de metingen goed reproduceerbaar met een meetonzekerheid van ongeveer één graad. (De procentuele onzekerheid in het bepalen van de tijdsconstanten is groter vanwege de grafische methode via figuur 9.)

De metingen kunnen met het programma IP.COACH verwerkt worden. Het meetpaneel van de UVA bevat twee kanalen 0-5 V en twee kanalen 0-1 V. Met sensoren op de eerste twee kanalen kunt u tot 120 °C meten en met sensoren op de laatste twee kanalen tot 80 °C. Wellicht biedt DMS ook mogelijkheden. Ik geef er de voorkeur aan dat de leerlingen zelf de resultaten (grafisch) verwerken, althans in klas 4. Het bovenstaande is misschien een aanknopingspunt voor het (door de WEN voorgeschreven) zelfstandig onderzoek in 6 VWO. Wie weet is er een leerling die hieraan evenveel plezier beleeft, als ik gehad heb!

Noten

1. Informatie bij dr. P. Licht, Nat. Laboratorium der Vrije Universiteit, De Boelelaan 1081, 1081 HV Amsterdam.
2. Leybold, catalogusnr. 666191.
3. NVON Maandblad 13 (1988), nr. 10, p. 407.
4. De k-waarde van uw school kunt u vinden in de „Weergave huisvestings-situatie” van het Ministerie van O en W, die gemaakt is in het kader van de nieuwe financieringssysteem.
5. De oplossing is gevonden door Bernoulli (de vader van de natuurkundige) en Lagrange en bevat een aantal integralen en e-machten. Er bestaan verscheidene computerprogramma's die de differentiaalvergelijking numeriek oplossen.
6. Artikelen in het tijdschrift Verwarming en Ventilatie, dec. 1981, mei 1982, aug. 1982.
7. Ing. Dubbeld e.a. in Verwarming en Ventilatie, sept. 1984.
8. Met dank aan ing. Aerts van het ISSO (Instituut voor Studie en Stimulering van Onderzoek op het gebied van gebouwinstallaties te Rotterdam) voor het doorspreken van enkele problemen en het ter beschikking stellen van relevante literatuur.
9. Ing. Ham in publikatie 540 van het Instituut voor Milieuhygiëne en Gezondheidstechniek TNO. Het model is - voor zover ik weet - ontwikkeld aan de Universiteit van Luik en gepresenteerd in een interne publikatie waarop ik (nog) geen beslag heb kunnen leggen. Daardoor heb ik geen inzicht waarop precies de formules gebaseerd zijn. Misschien weet een lezer hier meer van?
10. Onderzoeken van de TUD (faculteit Bouwfysica) en de TUE (faculteit Bouwkunde).