

Blok 8 Verwarmen

INHOUD

PRACTICUM	
P1	VERWARMEN VAN HUIZEN
P2	DE TEMPERATUUR IN HUIS
P3	TEMPERATUUR METEN
P4	TEMPERATUUR EN WARMTE
P5	WARMTETRANSPORT
P6	EVEN WARM MET MINDER ENERGIE

BASISSTOF	
TW1	VERWARMEN VAN HUIZEN
TW2	DE TEMPERATUUR IN HUIS
TW3	TEMPERATUUR METEN
TW4	TEMPERATUUR EN WARMTE
TW5	WARMTETRANSPORT
TW6	EVEN WARM MET MINDER ENERGIE

HERHAALSTOF	
H1	BEGRIPPEN UIT DIT BLOK
H2	WAAR HANGT HET WARMTE-TRANSPORT VANAF?

EXTRASTOF	
E1	WARM WATER MAKEN
E2	REKENEN AAN DE CENTRALE VERWARMING
E3	OEFENVRAGEN EN OPGAVEN

TIJDSINDELING

P1, T1, W1	1 lesuur
P2, T2, W2	1 lesuur
P3, T3, W3	1 lesuur
P4, T4, W4	1 lesuur
P5, T5, W5	1 lesuur
P6, T6, W6	1 lesuur
D-toets	1 lesuur
H/E-stof	2 lesuren
E-toets	1 lesuur
Totaal	10 lesuren

ALGEMEEN

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 energierekening.

BASISVORMING

Aan de orde komen de kerndoelen 7 en 8 van het domein 'Verbranden en verwarmen'. De kerndoelen 7.1 en 7.3 zijn in hoofdzaak besproken in blok 7.

BIJ BLOK 8

P1

De leerling inventariseert zijn door ervaring verkregen kennis van de verwarmingsinstallatie.

BIJ BLOK 8

P2

Met de klimaatkamer (een kleine modelwoning) wordt het temperatuurverloop in huis onderzocht. Ook de effectiviteit van diverse isolatiemaatregelen (dubbel glas, tempex, steenwol, kurk, enz.) wordt onderzocht. De proeven met de klimaatkamer zijn goed uit te voeren in korte tijd, mits op enkele dingen gelet wordt. Zie hiervoor het bijgevoegd artikel van H. 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 (bijv. 20 × 20 cm) en een sterke lamp (bijv. 100 W) dan zijn reeds na 10 minuten de temperatuurverschillen voor diverse isolatiematerialen 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 isolatiematerialen: 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 één lesuur alleen 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 8

P3

De leerlingen leren met een thermometer omgaan. Met een proefje wordt aangetoond dat ons gevoel geen goede temperatuurmeter is.

Benodigd materiaal:

- thermometer
- drie bekers met resp. koud, lauw en warm water
- bekers 100 ml

BIJ BLOK 8

P4

Nagegaan wordt of de leerlingen de begrippen warmte en temperatuur weten te onderscheiden. 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 bijv. 60 °C.

Benodigd materiaal:

- Proef 2: bekers met 50 ml water, thermometer, speld en (grote) spijker, gasbrander, kroezentang of iets dergelijks om speld en spijker in vlam te houden
- Proef 3: 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)

BIJ BLOK 8

P5

Twee manieren van warmtetransport worden 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.

Benodigd materiaal:

Proef 1: per groepje leerlingen 8 blokjes van een isolator resp. geleider, zoals: ijzer, messing, zink, aluminium, PVC, vurenhout, glas en kurk

Proef 2: ijzeren strip met 5 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 kopergas, gasbrander, enkele korrels permanganaat als kleurstof (demonstratieproef)

BIJ BLOK 8

P6

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 8 figuur 33 van het theorieboek. Ten slotte worden een aantal isolatiematerialen onderling vergeleken.

Benodigd materiaal:

- 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)

Laat proef 4 in aan het begin van de les inzetten. Meet de eindtemperaturen aan het eind van de les.

BIJ BLOK 8

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 T6.
- Het transportnet: de buizen en radiatoren (diverse typen in T2 figuur 12 blz. 240) met (thermostaat)kranen en circulatiepomp. (Wijs erop dat de pas later toegepaste pomp het gebruik van veel dunnere 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).

BIJ BLOK 8

T2

Het gaat hier vooral om het regelen van de temperatuur en het verloop van de temperatuur in huis. De kamerthermostaat voor de temperatuurregeling komt aan de orde. (De werking van een eenvoudige bimetaalthermostaat wordt in een leestekst met figuren besproken.) Het temperatuurverloop overdag wordt uitgelegd en 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.

BIJ BLOK 8

T3

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

BIJ BLOK 8

T4

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

De relatie tussen temperatuur en warmte, uitgelegd m.b.v. de molecuultheorie, begrip 'inwendige energie'.

BIJ BLOK 8

T5

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

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

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

BIJ BLOK 8

T6

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 dakkapisolatie, 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.

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 8

H1

Eerst moeten twaalf 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 8

H2

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

BIJ BLOK 8

E1

Naar aanleiding van een brief van een in Kenya werkzame arts moet de leerling 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 8

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 8

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 8

P1

- 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.

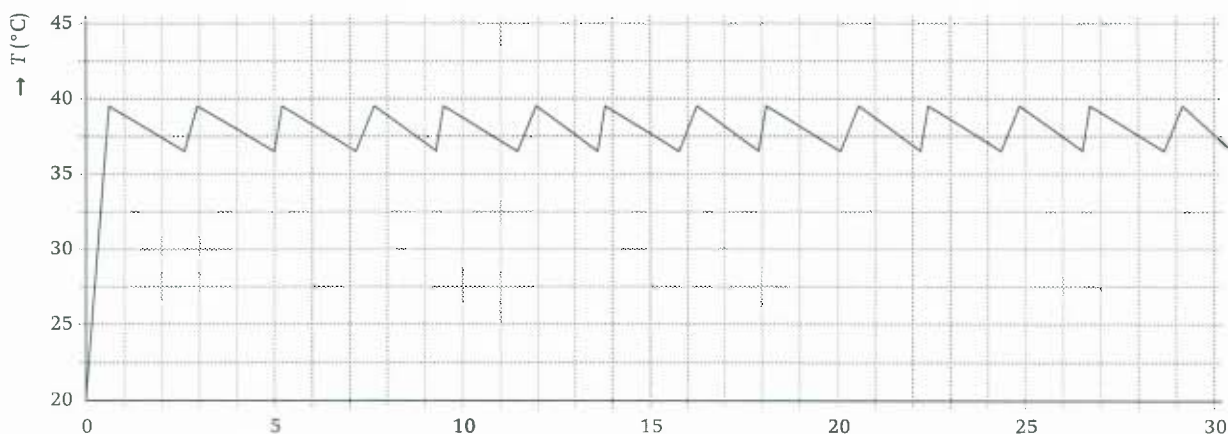
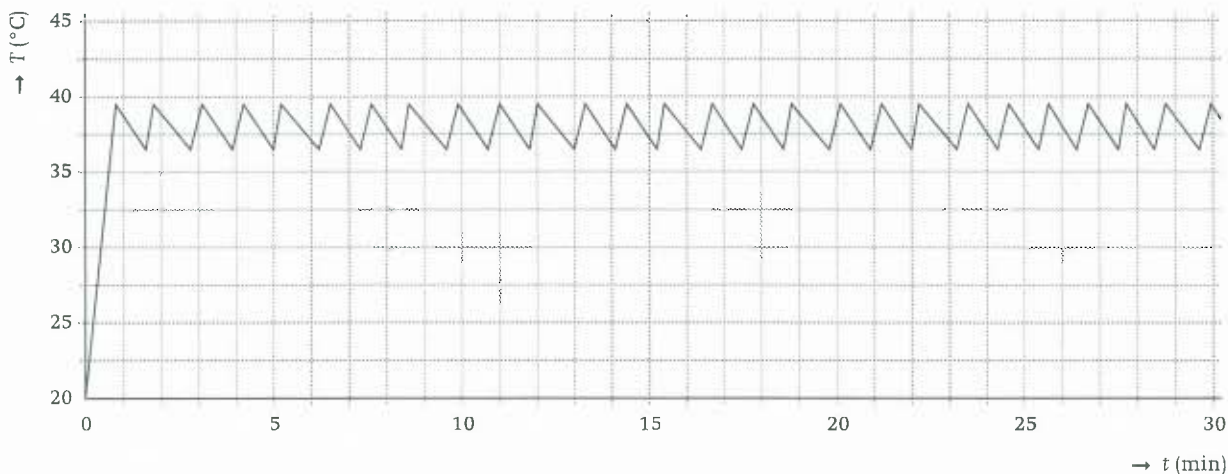
Functie, werking en plaats van de thermostaat worden in vraag 3 en 4 nagevraagd.

ANTWOORDEN BLOK 8

P2

De vragen 1 t.e.m. 6 worden gesteld n.a.v. de proeven met de klimaatkamer.

- Uit de grafiek van kanaal 1 uit figuur 3 in P2 blijkt dat de temperatuur is ingesteld op 38 °C. Als na inschakeling van de lamp de temperatuur van 38 °C is bereikt, schakelt de lamp uit.
- Ook als de lamp uit is, blijft deze nog warmte afgeven.
- De temperatuur gaat dalen als de klimaatkamer meer warmte afgeeft aan de omgeving dan de warmte die de lamp nog afgeeft.
- De lamp gaat aan bij 38 °C.
- De lamp moet eerst op temperatuur komen. Het duurt even voordat de lamp meer warmte afgeeft dan de klimaatkamer afgeeft aan de omgeving.
- Als de temperatuur stijgt, geeft de klimaatkamer meer warmte af aan de omgeving.
- Zie figuur.

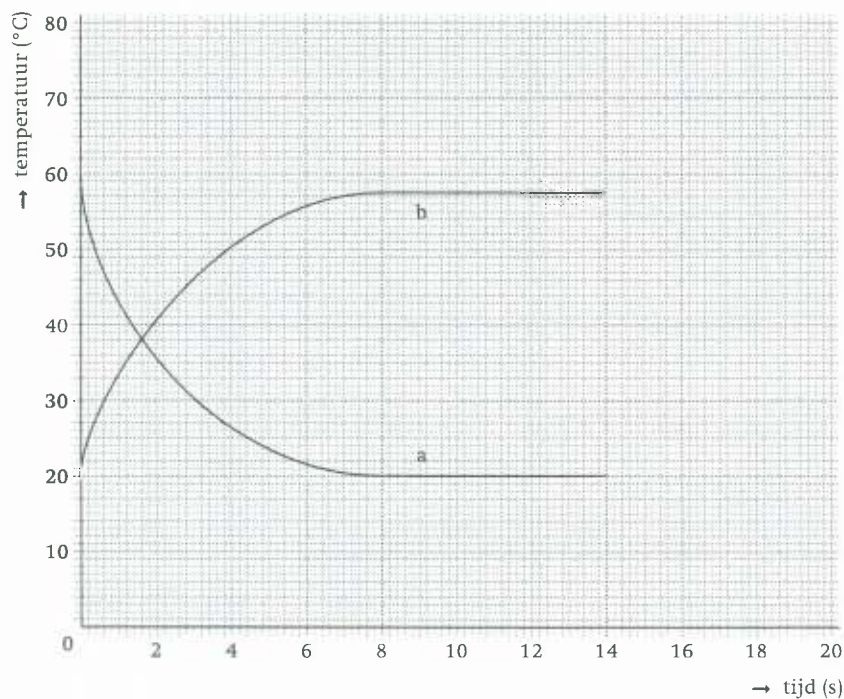


- Zie figuur. *Toelichting:* bij een lamp van 150 W stijgt de temperatuur sneller bij enkel glas, en nog sneller bij dubbel glas (minder verliezen). De temperatuurdaling is bij enkel glas hetzelfde, maar bij dubbel glas langzamer.

ANTWOORDEN BLOK 8

P3

- 1 **a** $19\text{ }^{\circ}\text{C}$
b $20\text{ }^{\circ}\text{C}$
c $21\text{ }^{\circ}\text{C}$
d Op dezelfde hoogte als het vloeistofpeil.
e $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ te veel of te weinig
- 2 **a** De vinger die uit het koude water komt voelt warm aan, de vinger die uit het warme water komt voelt koud aan.
- 3 **b** Zie figuur.



c Als de temperatuur van het water veel hoger is dan van de omgeving, geeft het water per seconde meer warmte af aan de omgeving.

ANTWOORDEN BLOK 8

P4

- 1 Als je het koud hebt, dan vind 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 **b** Temperatuur van de speld is ongeveer $450\text{ }^{\circ}\text{C}$.
c De temperatuur van het water in het bekersglas blijkt niet meetbaar veranderd.
e Ongeveer $450\text{ }^{\circ}\text{C}$.
f De temperatuur van het water in het bekersglas is nu wél meetbaar veranderd.
g 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 $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ duurt daarom langer dan bij de speldenkop.
h 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 de temperatuur in het bekersglas bij de spijker wél merkbaar stijgen.

- 3 a** Het water in beide pannen moet dezelfde begintemperatuur hebben (bijv. 60 °C).
b In de pan met 250 g water zal het water veel eerder koken dan in de pan met 500 g water, bijna in de helft van de tijd.
c De temperatuurstijging in beide pannen is natuurlijk even groot (bijv. 40 °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.

ANTWOORDEN BLOK 8

P5

- 1 a** Nee.
b Het ijzer
c Gerangschikt naar opklimmende warmtegeleidingscoëfficiënt zou de volgorde worden: kurk – vurenhout – glas – PVC – ijzer – zink – messing – aluminium.
d De temperatuur van je hand is *hoger* dan de temperatuur van de voorwerpen.
e Omdat de stof van het ene voorwerp 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, vurenhout, 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.
- 4 a** Het warme 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. 107 van het practicumboek circuleert het water dus tegen-de-klok-in.)
b Warm water heeft een kleinere dichtheid dan koud water. Daardoor stijgt het water in het verticale deel boven de brander en daalt het in het andere verticale deel.
c Als er een temperatuurverschil heerst.
- 5 a** Door te zorgen dat het bekerglas 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.

ANTWOORDEN BLOK 8

P6

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.

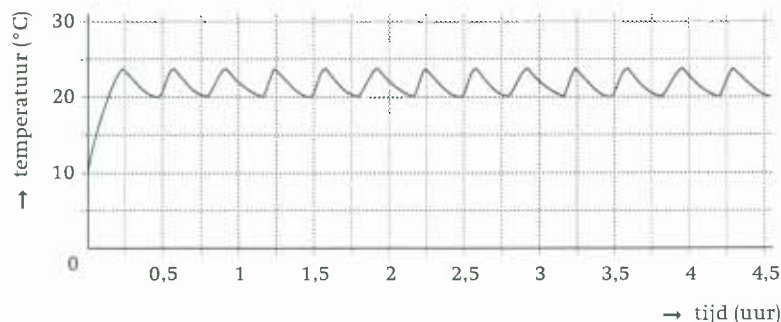
- 4c** Bij gebruik van een deksel minder stroming.
 Bij toepassing van isolatiematerialen (ook lucht) minder geleiding.

ANTWOORDEN BLOK 8

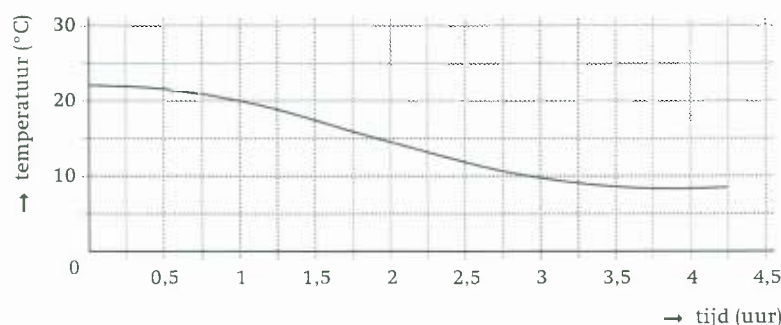
W1

- 1 ab** 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.
- 2** Het water in de *leidingen* en *radiatoren* dat door de *circulatiepomp* wordt rondgepompt.
- 3** 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.
 Het *expansievat* biedt het water de mogelijkheid om uit te zetten.
 Op de *drukmeter* is te zien of er voldoende water in de installatie zit.
- 4** Een gewone radiatorkraan staat open of dicht.
 Bij een thermostaatkraan hangt de stand van de kraan af van de temperatuur in de ruimte. Als de temperatuur lager is dan de ingestelde temperatuur, dan staat de kraan open. Is de temperatuur hoger, dan is de kraan dicht.
- 5** Als de temperatuur van het water in leidingen en radiatoren van de c.v.-installatie stijgt, zet het water uit. De uitzetting van het water wordt opgevangen door een membraan in het expansievat. Daardoor ontstaat er geen te hoge druk in de installatie.
- 6** Voor de verbranding van aardgas (of olie) is veel zuurstof (lucht) nodig.

1 Zie figuur.

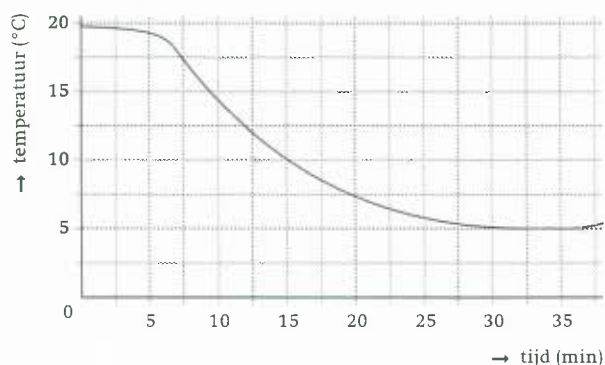


2 Zie figuur.

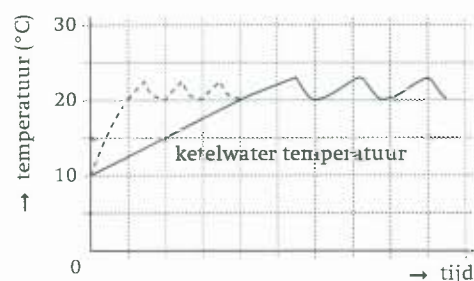


3 Bij vraag 1: de temperatuur stijgt snel bijvoorbeeld omdat de woonkamer goed geïsoleerd is, zodat er weinig warmte naar buiten verdwijnt. Doordat de temperatuur stijgt, neemt de warmteafgifte aan de omgeving toe. Als er per seconde evenveel warmte bijkomt dan er verdwijnt, wordt de temperatuur constant.
Bij vraag 2: er is meer warmteafgifte aan de omgeving, waardoor de temperatuur langzamer stijgt.

4 a Zie figuur.

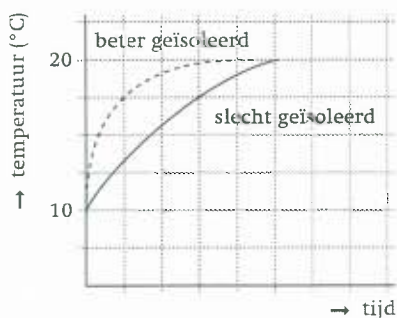


5 a De thermostaat staat ingesteld op 20 °C (of iets hoger).
b De radiatoren leveren nog warmte, want het water erin is niet ineens koud geworden.
c Het ketelwater en het water in de leidingen en radiatoren moeten eerst warmer worden.
d Zie figuur.



b 1 en 2 zijn onwaar, want de temperatuur daalt steeds verder naar 5 °C. Om die reden is 3 waar.
c 2 is waar als de omgevingstemperatuur van de cola gelijk is aan die van de cola zelf.

6 Zie figuur.



- 7 **a** De windsnelheid bepaalt de warmte-afvoer van het huis. Bij meer wind geeft het huis per seconde meer warmte af. De temperatuur zal sneller dalen; de verwarming zal langer moeten branden.
b De ligging van het vertrek t.o.v. andere kamers (bijv. veel buitenmuur en weinig binnenmuur), t.o.v. de zon (noord of zuid) en t.o.v. de meest voorkomende windrichting bepaalt weer de snelheid waarmee warmte wordt afgevoerd.
c De temperatuur in een slaapkamer mag lager zijn; de warmtebehoefte is lager.

ANTWOORDEN BLOK 8

W3

- 1 **a** Met een thermometer.
b Een vloeistofreservoir met een stijgbuis en geijkte schaalverdeling.
c 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 de stijgbuis.
- 2 **a** De graad celsius (°C). (Er bestaat ook een Kelvin-schaal en een Fahrenheit-schaal).
b De stand van het vloeistofpeil bij smeltend ijs is 0 °C; bij kokend water is dat 100 °C. De tussenliggende afstand is verdeeld in 100 gelijke delen van 1 °C.
- 3 **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.

- 4 **a** Met een gewone thermometer kun je temperaturen meten tussen de – 20 en + 50 °C; met een koortsthermometer tussen + 35 en + 42 °C. De koortsthermometer is dus veel gevoeliger en ook nauwkeuriger.
b Bij het meten van de lichaamstemperatuur (wel of geen koorts) gaat het juist om kleine temperatuurverschillen.

- 5 **a** Warmte is energie op transport.
b De eenheid van warmte is de eenheid van energie: joule (J).
c Als je de temperatuur in je kamer wilt verhogen, moet je warmte toevoeren. Door de hogere temperatuur verdwijnt er meer warmte naar buiten.

ANTWOORDEN BLOK 8

W4

- 1 **a** Dan zal de temperatuur ervan stijgen en neemt de gemiddelde snelheid van de moleculen toe.
b Dan zal de temperatuur ervan dalen en neemt de gemiddelde snelheid van de moleculen af.
- 2 **a** De kleinste kogel.
b Bij dezelfde energietoevoer zal de bewegings-energie van de moleculen van de kogel die het kleinste aantal moleculen bevat, het meest stijgen. Vergelijk: als je in een kleine en een grote fles evenveel water doet, zal de kleine fles daardoor voller worden.
- 3 **a** In het grote glas.
b Er is meer energie nodig geweest om de grotere hoeveelheid moleculen in het grote glas dezelfde temperatuur te geven. (De hoeveelheid toegevoerde energie per molecuul is hetzelfde.)
- 4 **a** In het opslagvat met weinig water. Door toevoering van de zonnewarmte aan weinig water zal de temperatuur daarvan sterker stijgen.
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.
- 5 **a** $100 \times 4,2 = 420$ joule
b $10 \times 420 = 4200$ joule
c Daartoe moet 500 g water 90 °C in temperatuur stijgen; dat kost $90 \times 500 \times 4,2 = 189\,000 \text{ J} = 189 \text{ kJ}$

ANTWOORDEN BLOK 8

W5

- 1 **a** Geleiding en stroming.
b Bij *geleiding* blijven de moleculen op hun plaats en wordt de bewegingsenergie van molecuul naar molecuul doorgegeven.
 Bij *stroming* kunnen de moleculen zich verplaatsen. Ook hier wordt de energie door de moleculen aan elkaar doorgegeven, maar omdat zij zich nu kunnen verplaatsen gaat het sneller.
c *Geleiding*: een ijzeren staaf die je aan de ene kant verhit, wordt ook bij het uiteinde heet.
Stroming: boven een radiator stijgt de verwarmde lucht op.
- 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 verchroomd staal, de handvatten van kunststof.
b Handvatten van kunststof voelen niet zo koud aan en geven meer grip; een stuur van kunststof is te zwak.
- 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 Koper gas is een goede geleider: het verdeelt de warmte van de vlam, zodat het bekglas geleidelijk verhit wordt.
- 6 **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.

- 7 Een thermosfles isoleert goed, omdat daarbij zowel geleiding als stroming zoveel mogelijk worden tegengegaan. Dit geldt zowel voor warmtetransport van buiten naar binnen als omgekeerd. Frisdrank zal in een thermosfles dus langer koud blijven.
- 8 **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 8

W6

- 1 **a** Energievoorraden zijn beperkt; bij verbranden van brandstoffen komen vervuilende stoffen vrij; energie is duur.
b Deuren en ramen op tijd dicht; geen apparaten onnodig aan laten staan; licht op tijd uitdoen.
c Ja.
- 2 **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.

- 3 **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.

- 4 **a** $1800 \times f \ 0,50 = f \ 900,-$
b In $12\ 000/900 = 13,3$ jaar

- 5 **a** Chemische energie (uit de brandstof) in warmte.
b Het is niet mogelijk om alle energie uit de verbrandingsgassen in nuttige energie om te zetten; er verdwijnt altijd warmte naar de omgeving door de schoorsteen.

c Bij een HR-ketel wordt een veel groter deel van de warmte uit de verbrandingsgassen 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).

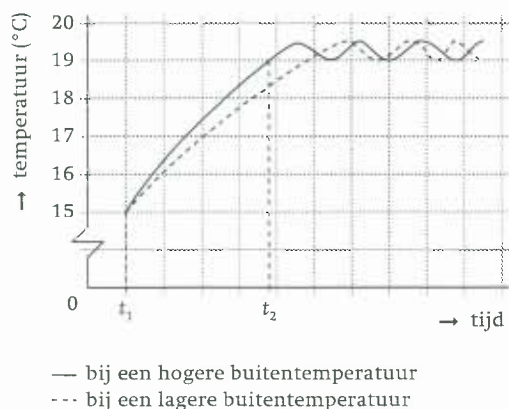
- 6 **a** $0,70 \times 3000 = 2100 \text{ m}^3$: bij een rendement van 100% zou immers maar 70% van het huidige verbruik nodig zijn.
b Bij een rendement van 90% zou nodig zijn:
 $100/90 \times 2100 \text{ m}^3 = 2333 \text{ m}^3$.
c Door de HR-ketel daalt het gasverbruik van 3000 m^3 naar 2333 m^3 , een jaarlijkse besparing van $3000 - 2333 = 667 \text{ m}^3$. Dit spaart per jaar $667 \times f \ 0,50 = f \ 333,50$. Die $f \ 1500,-$ worden dus terugverdiend in $1500/333,5$ jaar = 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.

ANTWOORDEN BLOK 8

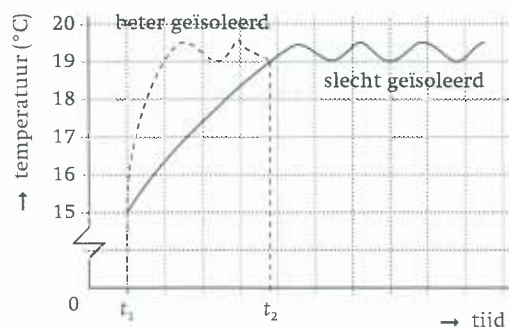
H1

- 1 1 Een centrale verwarming zorgt voor verwarming van een gebouw vanuit een ‘centraal’ geplaatste ketel.
2 Met de thermostaat wordt de temperatuur in huis ingesteld.
3 De radiator geeft warmte af aan de omgeving.
4 Een HR-ketel is een verwarmingsketel met een hoog rendement.
5 Met de temperatuur wordt aangegeven hoe warm of hoe koud het is.
6 Met een thermometer meet je de temperatuur.
7 Warmte is energie op transport.
8 Warmtetransport is de verplaatsing van warmte van de ene plaats naar de andere.
9 Geleiding is overdracht van warmte waarbij de moleculen op hun plaats blijven.
10 Stroming is overdracht van warmte waarbij de moleculen bewegen.
11 Door isolatie wordt overdracht van warmte beperkt.
12 Een thermosfles is een fles die goed geïsoleerd is.
- 2 **a** Uit de verwarmingsketel, de meet- en regelapparatuur en het transportnet met de radiatoren.
b In de *verwarmingsketel* wordt chemische energie (brandstof) door verbranding omgezet in warmte (heet water). Het *transportnet* brengt de warmte naar de verschillende vertrekken, waar de radiatoren de warmte afstaan aan de omgeving. De *meet- en regelapparatuur* is nodig om de temperatuur te regelen en voor de veiligheid.
c Hete radiatoren geven de warmte af aan de omgeving; hoe heter hoe beter.
d Voor een goede warmte-afgifte moeten de radiatoren goed geleidend zijn, dus van metaal.
e Hoe groter de oppervlakte, hoe meer warmte wordt afgegeven aan de lucht (door geleiding).
f Door de buizen te isoleren geven deze geen warmte af aan ruimtes die niet verwarmd hoeven te worden.

- 3 a Op 19°C .
 b Het duurt even voordat het water in leidingen en radiatoren op temperatuur is.
 c De radiatoren krijgen eerst nog warm ketelwater aangevoerd.
 d Als de temperatuur van het huis toeneemt, verdwijnt er (per seconde) meer warmte naar buiten. Het huis stijgt dan langzamer in temperatuur.
 e Zie figuur.



f Zie figuur.

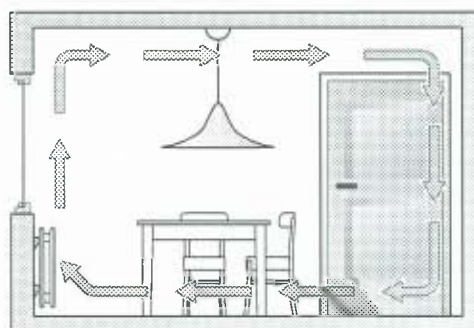


- 4 a Omdat er minder warmte naar buiten verdwijnt is er minder warmte nodig om het huis op te warmen en op temperatuur te houden.
 b Als het verschil in temperatuur tussen binnen en buiten kleiner is, verdwijnt er minder warmte naar buiten.
 c Er verdwijnt dan minder energie naar buiten. De temperatuur in huis zal sneller stijgen en langzamer dalen.
- 5 a Het aanbrengen van isolatie tegen de buitenkant van het huis, zoals radiatorfolie, spouwmuur- en dakisolatie en dubbel glas.
 b Door tochtwerende maatregelen, zoals het aanbrengen van tochtstrip.

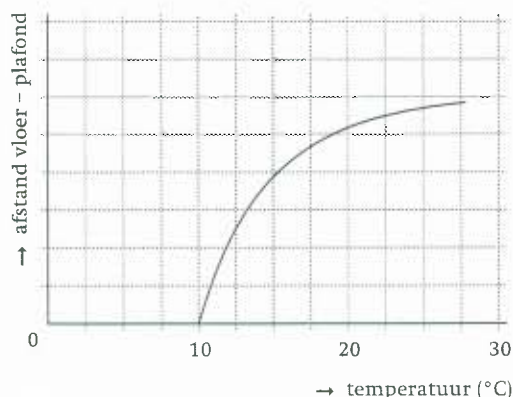
ANTWOORDEN BLOK 8

H2

- 1 a Geleiding en stroming.
 b Moleculen dragen energie aan elkaar over.
 c Bij geleiding blijven de moleculen op hun plaats (trillen om die plaats); bij stroming verplaatsen de moleculen zich.
 d In een vaste stof zitten de moleculen vast in een rooster.
 e De vacht bestaat uit isolerend materiaal (wol) waartussen veel lucht zit (een slechte geleider!). De lucht binnen de vacht kan niet stromen.
 f Omdat wind de warme lucht tussen de vacht kan doen wegstromen.
- 2 a Vervang de uitneembare zijwand van de klimaatkamer beurtelings door een wand van ander materiaal (bijv. enkel glas 3 mm, dubbel glas, triplex bekleed met radiatorfolie, aluminium plaat, enz.). Verwarm telkens 10 minuten met een flinke lamp (bijv. 75 W). Zorg dat je steeds ongeveer bij dezelfde temperatuur begint. Meet de temperatuur na 10 minuten verwarmen.
 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 uitneembare 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 41 (blz. 256 leerboek) treedt geen stroming op. Het verwarmingselement zit bovenin; 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, enz. (Vergelijk situatie in de figuur bij vraag **a**.)

- 4 a** De warme koffie stijgt omhoog en blijft daar (in thermosfles geen warmtetransport naar buiten). In het tweede kopje koffie zit dus koudere koffie van onderin.

b Koffiemelk is zwaarder dan koffie: grotere dichtheid én 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** Alleen het bovenste water wordt verwarmd door de zon en de warme lucht boven het water. Dit warmere water is lichter en blijft dus boven. Omdat water een slechte geleider is, zal het water in de diepte koud blijven.

b De waterlaag onder het oppervlak wordt verwarmd door absorptie van zonnestraling die door de bovenste laag heen gaat.

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

ANTWOORDEN BLOK 8

E1

- 1** Ja, die liter water van 100 °C geeft energie af waardoor deze 40 °C in temperatuur daalt; de liter water van 20 °C kan hiermee 40 °C in temperatuur stijgen.
- 2** 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. Bij die hogere temperatuur geeft het water meer warmte af aan de omgeving.
- 3** Benodigd: pan met 2 l water van 20 °C; eenzelfde pan met 1 l water van 20 °C. Campinggasbrander-tje; stopwatch en thermometer.
 Meet hoe lang het duurt om 2 l water van 20 °C te verwarmen tot 60 °C.
 Meet hoe lang het duurt om 1 l water van 20 °C te verwarmen tot 100 °C.

ANTWOORDEN BLOK 8

E2

- 1 a** Wanden, ruiten, deuren, vloer en plafond.
b Boven genoemde 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)
- 2 a** De temperatuur stijgt geleidelijk. Hoe hoger de temperatuur wordt t.o.v. de omgeving van het huis, hoe meer warmte aan de omgeving wordt afgestaan. Daarom stijgt de temperatuur steeds langzamer.
b De grafiek zou een rechte lijn zijn die samenvalt met het begin van de grafiek. De temperatuur zou blijven stijgen.
c Je ziet dat de temperatuur in 5 minuten stijgt van 15 naar 16,5 °C. Dat is $1,5/5 = 0,3$ °C per minuut.
- 3 a** Per seconde levert de ketel 15 kJ energie, dus per minuut: $60 \times 15 = 900$ 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).
 $K = Q/\Delta t = (900 \text{ kJ/min})/(0,3 \text{ °C/min}) = 3000 \text{ kJ/°C} = 3,0 \text{ MJ/°C}$
- 4** Uit de grafiek is af te lezen dat de temperatuur in 1 min stijgt van 20 naar 27 °C. De temperatuurstijging is dus 7 °C per minuut. In 1 minuut levert de lamp van 60 W: $60 \times 60 = 3600$ J.
 Dus de warmtecapaciteit $K = 3600/7 = 514 \text{ J/°C}$.

5 a Als de warmtecapaciteit van het huis groter is, zal het langer duren voor de gevraagde temperatuur is bereikt. De grafiek in figuur 43 zal dan langzamer stijgen naar de ingestelde temperatuur (19,4 °C).

b Als het huis slechter geïsoleerd is, zal er tijdens het opwarmen meer energie naar de omgeving verdwijnen. De grafiek in figuur 43 zal dan óók langzamer stijgen naar de ingestelde temperatuur (19,4 °C). Je krijgt dan een soortgelijke grafiek als bij vraag **a**.

6 a Met figuur 45 (blz. 258 leerboek) vind je het warmteverlies per seconde bij een temperatuurverschil binnen/buiten van 1 °C.

– 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 Bij een temperatuurverschil van 45 °C is dus nodig $45 \times 262 = 11\,790 \text{ W} = 12 \text{ kW}$. De ketel moet dus minstens 12 kW zijn.

ANTWOORDEN BLOK 8

E3

1 a Zie figuur (lijn a).

b In het begin neemt de temperatuur sneller toe. Na ongeveer 20 minuten wordt de ketel uitgeschakeld. Uit het verloop van de temperatuur tussen 25 en 35 minuten blijkt dat de ketel weer gaat branden als de temperatuur gedaald is tot 20,5 °C. Bij het opwarmen schiet de temperatuur door naar 22 °C.

c Zie figuur (lijn c).

2 a $100 - 10 = 90 \text{ °C}$

b Bij de verbranding van 1 m³ aardgas komt 33 MJ warmte vrij. Dus bij 0,015 m³ komt vrij: $0,015 \times 33 = 0,495 = 0,50 \text{ MJ}$.

c Verdwijnt met de hete verbrandingsgassen door het ontluchtingskanaal van de keuken.

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

3 a Chemische energie in elektrische energie.

b Per seconde verbrandt 40 m³ aardgas. Dat levert per seconde $40 \times 33 = 1320 \text{ MJ}$ warmte.

c De centrale levert per seconde 500 MJ elektrische energie. Dat is $500/1320 = 38/100$ -ste deel.

d Het water neemt iedere seconde op: $1320 - 500 = 820 \text{ MJ} = 820\,000 \text{ kJ}$.

e Daarmee kunnen $820\,000/20 = 41\,000$ huizen verwarmd worden!

f – Het bespaart een geweldige hoeveelheid brandstof.

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

– Het is goed voor het milieu: er komen veel minder schadelijke gassen in de atmosfeer.

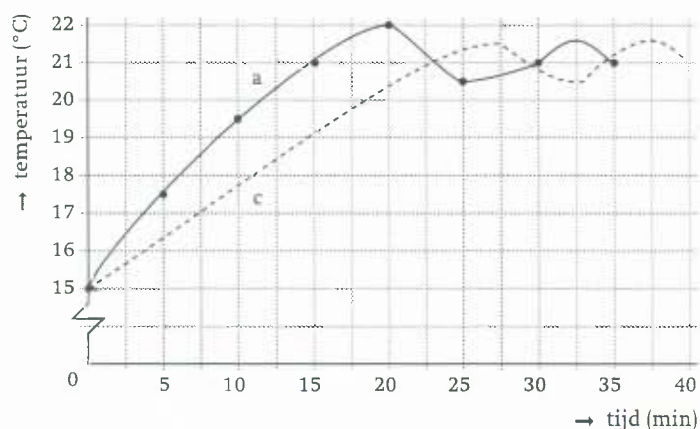
– Het (anders geloosde) warme koelwater zal nu ook geen algengroei veroorzaken.

4 a Geen geleiding, want wanden en deksel van de doos zijn van dubbelwandig kunststof met een isolerlaag 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. De warme aarde verwarmt de lucht die met de aarde in contact is. Die lucht zal dus opstijgen. Dat is thermiek.
- b** Geleiding bij de verwarming van de lucht door het aardoppervlak en stroming bij de thermiek.
- c** Op grotere hoogte daalt de temperatuur. De waterdamp in de lucht zal bij een bepaalde temperatuur 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 $(100 - 20) = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 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
 $504 \cdot 10^3 / 900 = 560\text{ s} = \text{ruim } 9\text{ minuten}.$
- c** De gasvlam levert per seconde maar 1650 J nuttige energie. Dus dat duurt:
 $504 \cdot 10^3 / 1650 = 305\text{ s} = \text{ongeveer } 5\text{ minuten}.$
- 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 lage temperatuur 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.

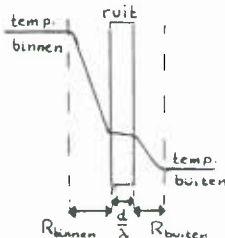
Het WEN-programma schrijft veel onderwerpen in context voor. In deze zin wordt de DBK-bovenbouwmethode herzien.¹ Het blok „Warmte in huis” voor klas 4 H/V heeft als centrale context de centrale verwarming. Aan de hand van het schema in figuur 1 komen begrippen als rendement, transport, soortelijke warmte 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 uitgebreider onderzoek, hetgeen verderop leidt tot een kritische beschouwing van zijn meetresultaten.

De k-waarde

In tabel 10 van het Binasboek staat de

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.

	$k \text{ (Wm}^{-2}\text{K}^{-1}\text{)}$
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

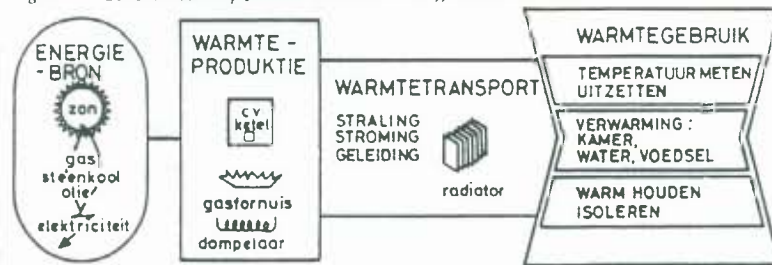
In Nederland wordt de vuistregel gehanteerd dat per m^2 wand met k -waarde k in een stookseizoen $10 \cdot k \text{ m}^3$ aardgas verstoekt wordt bij een binnentemperatuur van 20°C . Vervangt men in de woonkamer enkel glas door dubbelglas dan bespaart dit ongeveer 30 m^3 aardgas per m^2 glas.

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:

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



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

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

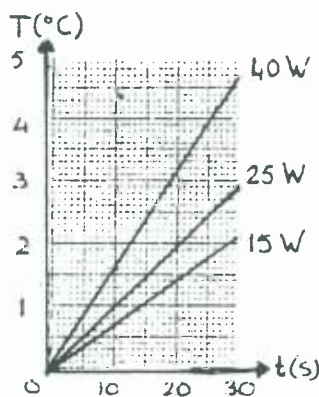
$T = T_{\text{kamer}} - T_{\text{buiten}}$ (op de kamertemperatuur kom ik aan het eind van het artikel terug)

A = oppervlakte van de kamerwanden.

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

$$P = C \frac{dT}{dt}$$

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:

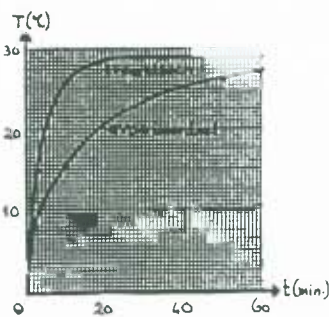
$$T(t) = \frac{P}{kA} \left(1 - e^{-\frac{kAT}{C}}\right) \quad (2)$$

Hieruit blijkt:

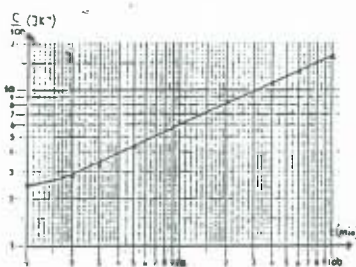
$T(e) = P/kA$ als $t = [\text{oneindig}]$.

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 grootte 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!), omdat de praktijk een afwijkend beeld geeft, zoals hierboven vermeld.

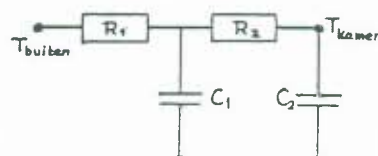
Op zoek naar een beter model dus.⁸

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

Figuur 7. Tijdsconstanten

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

uit van een warmteweerstand en een warmtecapaciteit in serie. Vaak draagt een ruimte zich als tweede-orde-systeem, dat beschreven wordt met 2 warmteweerstanden 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 tijdconstanten 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 $B = \frac{\tau_2(\tau_1 - \tau_0)}{\tau_0(\tau_1 - \tau_2)}$

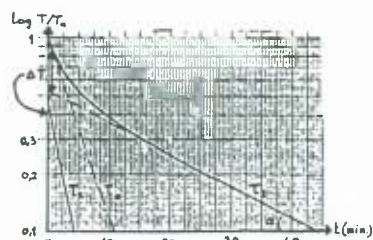
De waarde van de constanten τ_0 , τ_1 en τ_2 worden bepaald uit het $\log T/T(0)$ - t -diagram bij afkoeling volgens figuur 9.

Op deze wijze vond ik als gemiddelde voor de triplex klimaatkamer:

$$\tau_0 = 2,6 \cdot 10^2 \text{ s}, \tau_1 = 1,6 \cdot 10^3 \text{ s},$$

$$\tau_2 = 1,4 \cdot 10^2 \text{ s}.$$

(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 - t

Figuur 9
Bepaling tijdsconstanten

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

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

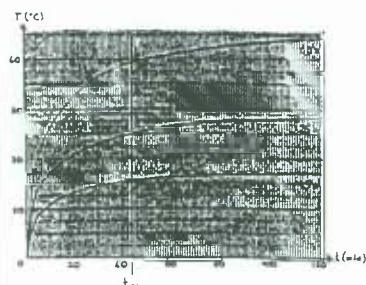
(4) wordt dan:

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

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 $4,6 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$.



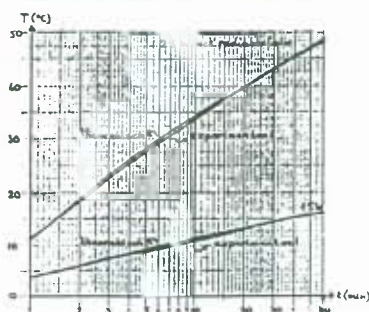
Figuur 10
Temperatuurverloop in de kleine kamer

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.

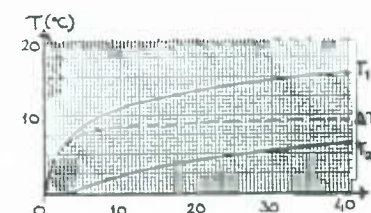
De metingen van Berends

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.



$$\begin{aligned} T_1 &= T_{\text{binnen}} - T_{\text{buitenlucht}} \\ T_2 &= T_{\text{buitenwand}} - T_{\text{buitenlucht}} \\ \Delta T &= T_1 - T_2 \end{aligned}$$

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_1 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