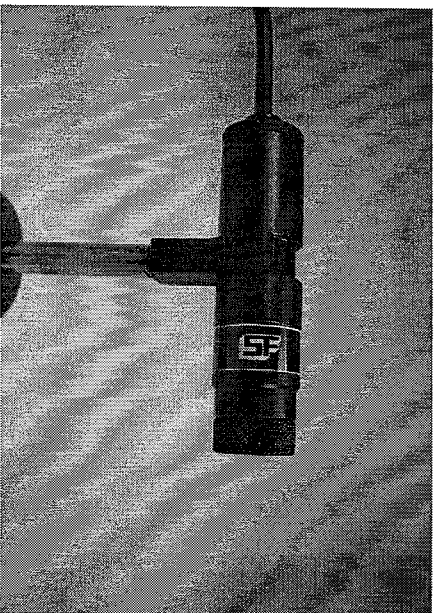


Varmeutdstråling vs. temperatur og tid ØVELSESVJLEDNING

Formål

Forsøget går ud på at efterprøve *Stefan-Boltzmanns strålingslov* på et varmt sortlegeme.

Desuden skal vi undersøge, hvordan legemets temperaturfald afhænger af tiden og vise, at temperaturfaldet følger *Newtons afkølingslov*.



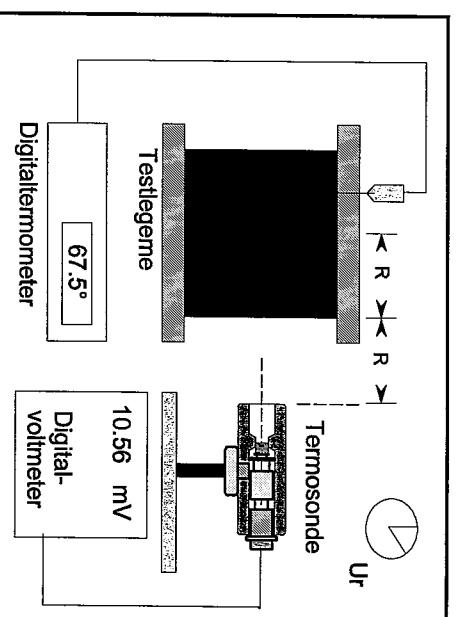
Figur 1: Solidata type 100TD termosonde detector måler (uden glasfilter) stråling fra 250 nm (ultraviolet) til 20 μm (varmestråling).

Udstyr

Til øvelsen kan man benytte en Solidata 100TD elektronisk termosonde, som vist i figur 1. Desuden skal man anvende en cylindreformig, sortmalet metaldåse, som kan rumme ca. 1 kilogram vand. Dåsen skal hvile på et stykke flamingo eller andet isolerende stof, og den skal ligeledes dækkes af et isolerende materiale. Forsøgsopstillingen er vist i figur 2. Bemærk, at termosondens forkant placeres i en afstand på én dåseradius fra siden af dåsen. Ca. 1 kilogram kogende vand hældes på dåsen.

Temperaturen skal løbende registreres ved hjælp af et passende termometer, tiden skal noteres, og udstrålingen fra dåsen måles ved hjælp af termosonden. Bemærk, at til dette forsøg skal glasfiltret og collimatoren være fjernet fra termosonden, således at den termiske udstråling fra legemet kan nå frem til detektoren. Man bør notere tid, temperatur og ud-

stråling ca. hvert andet minut. Mens forsøget kører, kan man godt lave nogle af grafene, der skal afleveres sammen med rapporten. Data kan noteres i en tabel som følgende:



Figur 2 Måleopstillingen med termosonden (uden filter og collimator), termometer og testlegeme. Sonderne kan også slutes til f.eks. Science Workshop datafangst system..

Teori

Når et legeme taber varmeenergi til omgivelserne, sker dette ved: (1) varmeledning, (2) konvektion og (3) varmestråling. Varmeledning foregår ved overførelse af legemets molekylbevægelser via den fysiske kontakt mellem legemet og det faste underlag. Ved konvektion overføres varme fra legemet til den omgivende luft, der på grund af denne opvarmning stiger til vejrs og hele tiden erstattes af køligere luft. Varmeutdstrålingen fra et legeme med en temperatur på omkring $50^\circ\text{C} \approx 323\text{ K}$ består af langbølget infrarød med bølglængder omkring 20.000 nanometer. Det er netop denne varmestråling, som termosonden måler. Forsøgets formål er blandt andet at undersøge fordelingen af varmetabet mellem varmeutdstråling og de to andre varmetabsprocesser.

Ved hjælp af dette forsøg kan man undersøge to lovregnsigheder. Den ene, *Stefan-Boltz-*

manns lov, beskriver netop varmeudstrålingen fra et legeme, og den anden, *Newtons afkølningslov*, beskriver temperaturfaldet som funktion af tiden.

Stefan-Boltzmanns lov

Det viser sig, at når et fuldkomment *sortlegeme* udstråler varmeenergi P_s målt i watt per kvadratmeter, er udstrålingen givet ved Stefan-Boltzmanns lov:

$$P_s = \sigma \cdot T^4$$

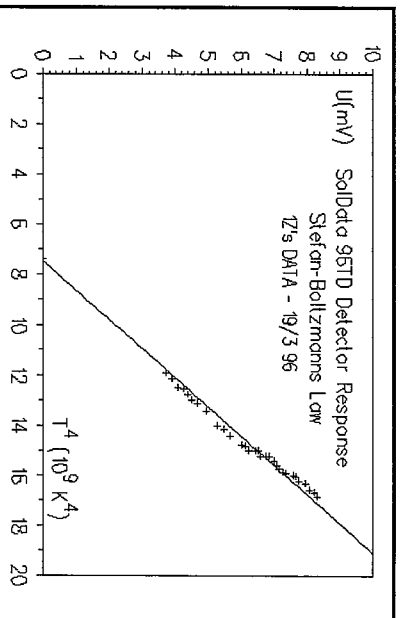
hvor $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ er Stefan-Boltzmanns konstant, og T er legemets absolutte temperatur. Hvis andre legemer i omgivelserne har temperaturen T_0 , modtager legemet også stråling fra dem, således at den samlede udstråling bliver:

$$P_s = \sigma \cdot T^4 - \sigma \cdot T_0^4$$

Hvis der ikke er tale om et perfekt sortlegeme, skal man tage hensyn til legemets *emissivitet* ϵ . Emissiviteten $\epsilon=1$ for det perfekte sortlegeme. Ellers ligger emissiviteten i intervallet fra 0 til 1. Er $\epsilon \neq 1$ gælder:

$$P_s = \epsilon \cdot \sigma \cdot (T^4 - T_0^4).$$

Når de målte data afbildes som vist i figur 3, kan man aflæse to interessante størrelser:



Figur 3 Detektorresponsen i millivolt vs. kelvin-temperaturen i 4. potens.

Læg mærke til, hvor den rette linie skærer førsteaksen, svarende til at detektorresponsen er lig med nul. Denne værdi bør svare til omgivelsernes temperatur T_0 i fjerde potens. For eksempel: Aflæses $T_0^4 = 7,3 \cdot 10^9$, er $T_0 = 292,3$

$$K = 19,3^\circ\text{C}.$$

Aflæser man grafens hældningskoefficient, bør den svare til $\epsilon \cdot \sigma$. Når vi har valgt at placere sonden i en afstand svarende til 2 gange dåsens radius, er det fordi at man i denne afstand kan påregne, at udstrålingen per arealenhed netop er halvdelen af udstrålingen ved dåsens overflade. (Arealet af en cylinder med radius $2R$ er netop dobbelt så stort som arealet af en cylinder med radius R .)

Ændringen i ordinaten aflæses til 10 mV, mens ændringen i abscissen er $(19 \cdot 10^9 - 7,3 \cdot 10^9) = 11,7 \cdot 10^9 \text{ K}^4$. Uden glasfilter og uden collimator er denne sondes respons ca. 80 mV, når strålingsintensiteten er på 1 kW/m². (Dette kan f.eks. kontrolleres ved at rette sonden mod solen. Se øvelsen om brugen af sonden som pyrheliometer for mere herom.) Responsen er altså 0,080 mV/(W/m²), og grafens hældning bliver:

$$\epsilon \cdot \sigma = 2 \cdot \frac{10 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}}{0,080 \frac{\text{m}^2}{\text{m}^2}} = 2,137 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4}$$

Da Stefan-Boltzmann konstanten $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$, har vi i dette eksempel fundet en emissivitet $\epsilon = 2,137 \cdot 10^{-8} / 5,67 \cdot 10^{-8} = 0,377$.

Newtons afkølningslov

Betragt et varmt legeme med begyndelsestemperatur T_s i et område, hvor omgivelsernes temperatur er T_0 . Legemets temperatur T aftænger af tiden t . Erfaringer har vist, at temperaturdifferensen mellem legemet og omgivelserne aftager som en eksponentiel udvikling således:

$$T(t) - T_0 = (T_s - T_0) \cdot e^{-\mu t}$$

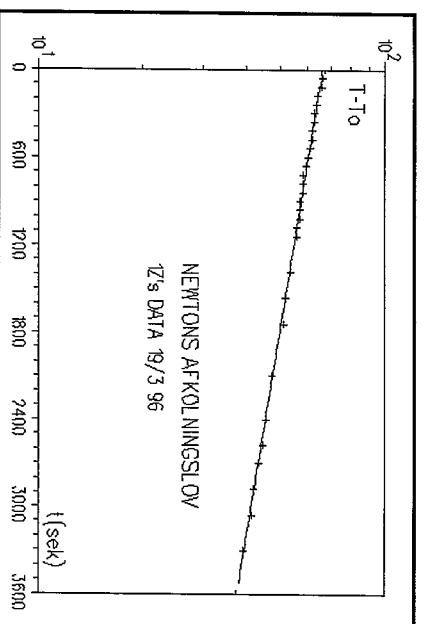
Bemærk, at $T(t) - T_0$ er den aktuelle temperaturdifferens klokken t mellem legemet og omgivelserne, og $(T_s - T_0)$ er temperaturdifferensen klokken $t = 0$.

Vi kan her indføre *halveringstiden* $t_{1/2}$, som et udtryk for, hvor lang tid der skal gå, før temperaturdifferensen $T - T_0$ er blevet halveret, svarende til at eksponentialfunktionen $e^{-\mu t} \cdot t_{1/2} = 1/2$. Tager man den naturlige logaritme til begge

sider af denne ligning, når man frem til, at:

$$\text{Halveringstiden: } t_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln 2}{\mu}$$

Figur 4 viser typiske resultater af målinger af temperaturforskellen vs. tiden. I dette forsøg var omgivelsesens temperatur $T_0 = 20^\circ\text{C}$, og starttemperaturen $T_s = 87^\circ\text{C}$.



Figur 4: Temperaturdifferensen $T - T_0$ aftager eksponentielt med tiden t .

Grafen skal forlænges lidt for at finde frem til punktet, hvor temperaturforskellen, som i starten var 67°C , er faldet til $33,5^\circ\text{C}$. Ved aflæsning finder man, at halveringstiden $t_{\frac{1}{2}} = 4320$ sekunder. Ud fra halveringstidsformlen kan man så bestemme μ :

$$\mu = \ln 2/t_{\frac{1}{2}} = 0,00016 \text{ s}^{-1}.$$

Energibevarelse

Ved dette forsøg kan man konstatere størrelsen af den samlede varmestråling Q_U ved en given temperatur T_i . Ligeledes kan man med kendskab til det varme legemes temperaturfald i løbet af et kort tidsinterval Δt beregne legemets samlede varmetab Q_r . Som nævnt tidligere, er der to andre varmetabmekanismer: varmeledningstabet Q_L og konvektionstabet Q_K . Ved energibevarelse gælder derfor:

$$Q_r = Q_U + Q_L + Q_K$$

Betragt typiske måledata for et varmt legeme ved en temperatur på omkring 80°C . Disse data vises i tabel I.

Lad os koncentrere vores opmærksomhed omkring perioden fra det 10. til det 12. minut.

t(min)	T° C	U(mV)
9	81,0	7,13
10	80,2	7,07
11	79,3	6,99
12	78,3	6,85
13	77,3	6,77

Tabel I: Typiske måledata omkring 80°C .

Vi har fundet $\epsilon=0,377$, Stefan-Boltzmann konstanten $\sigma=5,67 \cdot 10^{-8}$ og omgivelsesens temperatur $T_0 = 20^\circ\text{C} = 293 \text{ K}$. Hvis vi benytter temperaturen $T = 79,3^\circ\text{C} = 352,3 \text{ K}$ midt i tidsintervallet, får vi en udstrålingseffekt:

$$P = 0,377 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot (352,3^4 - 293^4) = 171,75 \text{ W/m}^2$$

Det cylinderformede legeme har en højde $h=12 \text{ cm}$ og en radius $r=4,75 \text{ cm}$. Toppen og bunden er dækket af isolerende flamingoskiver, således at udstrålingen herfra er minimal. Legemets udstrålingsareal A er hermed:

$$2\pi \cdot 0,0475 \cdot 0,12 = 0,0358 \text{ m}^2$$

Herved bliver det samlede effekttab $P \cdot A = 6,151 \text{ W}$. På de to minutter, som vi betragter, altså på 120 sekunder, er strålingstabet $Q_U = 738,1 \text{ J}$.

I dette tidsrum falder temperaturen fra $80,2^\circ$ til $78,3^\circ$. Desuden består legemet af $0,867 \text{ kg}$ vand med $C_V = 4186 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$ og $0,105 \text{ kg}$ ståldåse med $C_V = 460 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$. Herved finder vi legemets varmekapacitet $C = 3677,6 \text{ J/K}$, og et temperaturfald ΔT på $1,9^\circ\text{C}$ svarer således til et samlet varmeenergitab på $Q_r = 6987 \text{ J}$.

Afslutningsvis kan vi opstille en tabel over, hvorledes varmetabsforholdene har været omkring det 11. minut.

Disse data vises i tabel II på næste side.

Udstråling Q_u	$Q_L + Q_K$	Varmetab Q_r
738 J	6249 J	6987 J
10,6%	89,4%	100%

Tabel II: Varmetabsforhold ved minut 11.

En lignende analyse kan gennemføres under hele varmetabsprocessen for at afsløre sammenhængen mellem udstrålingstab og andre tabsprocesser set i forhold til det totale varmetab fra testlegemet. Da udstrålingstab stiger med den absolute temperatur i 4. potens, kommer udstrålingen ved højere temperaturer til at spille en større og større rolle i forhold til de øvrige varmetabsprocesser.

RAPPORTEN

Din rapport bør indeholde en beskrivelse af forsøget med en klar tegning af opstillingen og angivelse af fremgangsmåden. Du bør vise dine observationer i tabelform samt følgende grafiske afbildninger:

- $U(mV)$ vs. T^4 med angivelser og fortolkninger af skæringspunktet med førsteaksen og grafens hældningskoefficient.
- $T - T_0$ vs. t på semilogaritmisk papir. Du bør aflæse grafens halveringstid, altså tiden det tager for temperatur-differencen at blive halveret. Find ved hjælp af $t_{1/2}$ frem til en værdi for temperaturfaldskoefficienten μ .
- Lav evt. en regnearksmodel, der viser størrelsen af det samlede varmetab, udstrålingstab og andre varmetab i løbet af forsøgsperioden.
- Du bør i din konklusion kommentere, hvorvidt teorien og dit forsøg stemmer overens med hinanden inden for forsøgets målesikkerhed.