

Temperatur og varme

Dag Kristian Dysthe, Anja Røyne, and Ole Ivar Ulven

Fysisk institutt, UiO

(Dated: February 11, 2013)

Målene i denne oppgaven er å lære om termometri (hvordan måle temperatur) og om å måle termisk diffusivitet. Du vil også lære om å planlegge et eksperiment.

I. BAKGRUNN

Alle har et forhold til temperatur, varme og kulde. I dagligspråket bruker vi begrepene om hverandre mens i fysikken har de presis betydning definert i termodynamikken. Termodynamikk er bokholderi basert på tre grunnsetninger og etter noen hundre år med diskusjoner om hva som var bevart (kraft, energi...) så uttalte Einstein at “Termodynamikken er den eneste generelle fysiske teori som jeg er overbevist om at aldri vil bli forkastet”. Siden alle de tre (empiriske) grunnsetningene omhandler temperatur og varme gjengir vi en formulering av dem:

0. Lov. Termisk likevekt: Hvis to termodynamiske system hver for seg er i termisk likevekt med et tredje system så er de to første i termisk likevekt med hverandre.

1. Lov. Energibevaring: Endringen i indre energi, U , til et system er lik summen av varmen tilført systemet, Q , og arbeidet utført på systemet, $-W$: $\Delta U = Q - W$

2. Lov. Entropi: Varme kan ikke spontant strømme fra et material ved lav temperatur til et material ved høy temperatur.

Det som definerer termisk likevekt i nullte lov er at temperaturen, T , til systemene er lik. Det er faktisk slik man vanligvis måler temperatur: man bringer termistoren i termisk likevekt med det man vil måle og så leser man av temperaturen *til termistoren*. Første lov definerer også varme: Det er transport (eller strøm) av energi (som ikke er arbeid). Temperatur er altså en tilstandsvariabel mens varme er en energistrøm. Siden der ikke finnes noen måte å måle varme direkte, så må man måle temperatur for å beregne varme. Andre lov forteller noe om hvilken vei varmen kan strømme.

A. Termometri

SI-enheten for temperatur er definert slik: *The kelvin, unit of thermodynamic temperature, is the fraction 1/273.16 of the thermodynamic temperature of the triple point of water.* Det vil si at vi vet at det finnes et absolutt nullpunkt og så definerer vi at trippelpunktet til vann er ved 273.16 K. Men det å kalibrere måleinstrumenter slik at de viser den *termodynamiske temperaturen* er ikke så

lett. Vi skal nøye oss med praktisk termometri der vi antar at vi har en kalibreringskurve allerede eller vi har noe å kalibrere mot. Vi skal se på fire måleprinsipper, temperatursensorenens effekt på:

1. væskevolum
2. elektrisk motstand
3. elektrisk potensial
4. varmestråling

De tre første typen måleinstrumenter baserer seg på at en bringer temperatursensoren i termisk likevekt med det man skal måle temperatur på. Man må ofte tenke seg godt om for å være sikker på at man oppnår det. Den siste typen måleinstrument baserer seg på å måle *strålingen fra overflaten* av et objekt.

1. Væske i glass

Det tradisjonelle termometeret som ikke krever strøm eller annet avlesningsinstrument enn øyet baserer seg på at væsker utvider seg når temperaturen stiger. De er praktiske i mange sammenhenger, men egner seg dårlig til å logge temperatur automatisk. Vi har ett væsketermometer med kalibreringssertifikat som dere kan få bruke.

2. Motstandstermometre

a. Metall Elektrisk motstand i metaller øker med temperaturen. Valenselektronene i metaller flyter omkring og “renner” i retning av lavere elektrokjemisk potensial. Det viktigste hinderet for denne strømmen er kollisjoner med metallionene. Jo mer metallionene vibrerer termisk dess mer interfererer de med elektronene og den elektriske motstanden øker. For enkelte metaller (som platina) øker motstanden nesten helt lineært med temperaturen. Derfor er platina mye brukt som termistorer (ofte kalt PT100), men du kan bruke et hvilket som helst metall for å lage deg din egen termistor.

b. Halvledere Det aktive elementet i termistorer som brukes til temperaturmåling (NTC) er små biter av halvledere laget av f.eks. keramiske metalloksyder eller silisium og germanium. Antallet elektroner som eksiteres til ledningsbåndet øker med temperaturen og dermed går

den elektriske motstanden, R raskt ned med økende temperatur:

$$\frac{1}{T} = a + b \ln(R) + c \ln(R)^3, \quad (1)$$

der a , b og c er tilpasningsparametre i denne kalibreringsmodellen som kalles Steinhart-Hart-ligningen. Termistorer kan vanligvis ikke brukes ved temperaturer over noen få hundre grader Celsius.

3. Termoelement

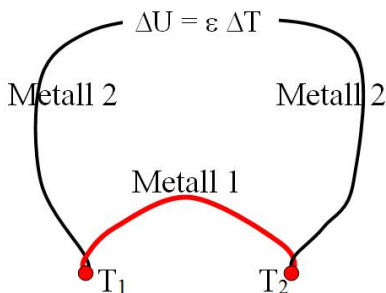


FIG. 1: Måling av temperaturforskjellen $\Delta T = T_2 - T_1$ ved å måle termospenningen $\Delta U = \varepsilon \Delta T$ mellom to metaller med kontaktpunktene ved T_1 og T_2 .

Termoelektrisitet, at temperaturforskjeller fører til elektrisk potensialforskjeller og vise versa, ble oppdaget på 1800-tallet og har blitt brukt til temperaturfølere siden det. Prinsippet er at for å være i termodynamisk likevekt må to metaller (eller halvledere) i kontakt ha det samme elektrokjemiske potensialet. Siden likevekt også forutsetter lik temperatur så fører det til at der er et sprang i elektrisk potensial i kontakten mellom de fleste metaller. Dette spranget i elektrisk potensial er temperaturavhengig. For å måle dette spranget må man koble metallene til en elektrisk krets. Det vil si at en må ha minst to slike kontaktpunkter og at den termoelektriske spenningen man måler er proporsjonal med temperaturforskjellen mellom de to kontaktpunktene. Termoelementer måler m.a.o. temperaturforskjeller mellom kontaktpunkter. Hvis man setter det ene kontaktpunktet ved 0°C og bruker $\varepsilon = \partial U / \partial T$ i $[\text{V/K}]$ så måler man temperatur i grader Celsius.

4. Strålingstermometer

Alt som har en temperatur over 0 K sender ut elektromagnetisk stråling. Varmestrømmen, dQ/dt fra en svart flate med areal A er gitt av Stefan-Boltzmanns

strålingslov:

$$\frac{dQ}{dt} = I_s = A\sigma T^4, \quad (2)$$

Dette er den totale strålingen integrert over alle bølglengder og strålingsretninger. En svart flate vil si at det er en flate som ikke reflekterer noe stråling. Stråling som treffer en virkelig flate kan gjøre tre ting: reflekteres, transmitteres eller absorberes. Det vil si at den totale strålte effekten (intensiteten) mot flaten er:

$$I = I_R + I_T + I_A \quad (3)$$

De tilsvarende fraksjonene av energi kalles reflektans, $r = I_R/I$, transmittans, $t = I_T/I$, og absorpsans, $a = I_A/I$ og summen må være lik 1:

$$1 = r + t + a. \quad (4)$$

Emmissiviteten til en flate er lik absorpsansen til flaten, $e = a$ og for materialer som ikke er gjennomsiktige i det aktuelle bølglengdeområdet så er

$$1 = r + e. \quad (5)$$

Alle disse koeffisientene er generelt sett vinkelavhengige (se Fresnels ligninger for ikkeabsorberende materialer), men for små vinkler med flatenormalen er det sjelden målbart. Siden alt stråler så både sender og mottar alle objekter stråling og varmetapet kommer derfor an på temperaturen til omgivelsene, T_o :

$$\frac{dQ}{dt} = eA\sigma(T^4 - T_o^4), \quad (6)$$

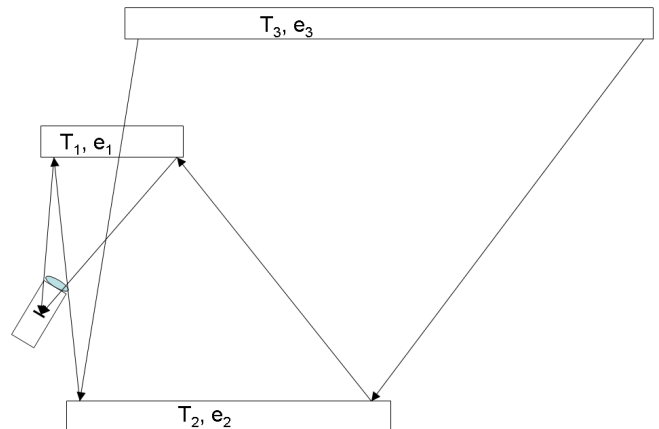


FIG. 2: Stråling som når et IR-termometer er ofte sammensatt av stråling fra mange objekter med hver sin temperatur og emmissivitet.

Et strålingstermometer er en sensor som måler innstrålt varme og bruker en kalibrert variant av ligning (6) til å beregne temperaturen til objektet som stråler

inn på sensoren. De har også en linse som gjør at de tar imot stråling fra en viss romvinkel. Denne linsen har som oftest et transmisjonsbånd ett sted mellom 3 og 12 mikrometer bølgelengde. Kalibreringsligningen som brukes i instrumentet er basert på at sensoren bare mottar stråling i dette smale båndet. Det aller viktigste å huske når man bruker et strålingstermometer er at hvis en overflate er blank for ditt øye så er ofte e liten og r stor også i det bølgelengdeområdet der strålingstermometret måler. Da måler du fraksjonen e av strålt energi fra objektet og fraksjonen r av stråling reflektert fra bakgrunnen. Det er derfor avgjørende for hva du måler hva bakgrunnen er. Dette går an å korrigere for. La oss summere opp bidragene til innkommende stråling, I , på detektoren slik den er vist i figur 2:

$$I = e_1 I_S(T_1) + r_1 (e_2 I_S(T_2) + r_2 (e_3 I_S(T_3) + r_3 (...))) \quad (7)$$

Her er $I_S(T)$ den utstrålte intensiteten fra en svart kropp (som i ligning (2)) ved temperatur T over det aktuelle areal og romvinkler. De enkleste strålingstermometre har satt en fast emmisivitet, e , (vanligvis $e = 0.95$) i kalibreringsmodellen sin og neglisjerer sannsynligvis bidrag fra reflekser fra objekter ved andre temperaturer. Det vil si at de beregner en funksjon $T = g(I/e')$ der e' er den antatte emissiviteten til flate 1. I et mindre temperaturområde (50-100 K stort) kan man vanligvis linearisere: $T = T_1 + \alpha(I - I(T_1))$, der α er stigningstallet ved $T = T_1$. Dersom e_2 er stor (> 0.8) så er følgende en god approksimasjon for den målte temperaturen:

$$T = T_1 + r_1 e_2 (T_2 - T_1). \quad (8)$$

Det er også greit å huske på at ikke alt som er gjennomsiktig for øyet ditt er gjennomsiktig for IR-stråler og vise versa.

Sensorene i de vanligste strålingstermometre er små, tynne, absorberende flater med en serie termoelementer (kalt en termokjede på norsk) som måler temperaturen til flaten relativ til en referanse inni instrumentet. Termiske kameraer derimot bruker halvlederelementer som genererer elektroner som kan avleses, omtrent som i vanlige digitale kameraer.

B. Varmekapasitet og varmeledning

Vi kan måle temperatur, men energien som strømmer er varme. Forholdet mellom temperaturen til en kropp og energien den inneholder i form av varme er gitt av *den spesifikke varmekapasiteten*, $c_{v/p}$. Varmekapasiteten avhenger av om kroppen tillates å utvide seg pga. temperaturendringen eller ikke, c_v er varmekapasiteten dersom volumet holdes konstant og c_p hvis trykket holdes konstant. Varmen Q som strømmer inn i en kropp med masse m mens den endrer temperatur fra T_0 til T_1 er gitt av

$$\frac{\partial Q}{\partial T} = \rho c_{v/p} \quad (9)$$

	$c_{p,m}$ [kJ kg ⁻¹ K ⁻¹]	$c_{p,v}$ [J cm ⁻³ K ⁻¹]	λ [W m ⁻¹ K ⁻¹]	ρ [g cm ⁻³]
Vann	4.2	4.2	0.58	1
Luft	1.0		0.024	0.0014
Al	0.9	2.4	250	2.7
Stål	0.45	3.5	50	7.8

TABLE I: Materialegenskaper for vann, aluminium og jern. De spesifikke varmekapasitetene $c_{p,m}$ og $c_{p,v}$ er henholdsvis per masseenhed og per volumenhet. λ er varmeledningsevnen og ρ er tettheten. Jeg beklager at jeg ikke har rukket å finne usikkerheten til disse tallene.

$c_{v/p}$ er materialkonstanter som ikke kan beregnes vha. termodynamikk men som må måles eller beregnes fra mikroskopiske teorier.

Klassisk termodynamikk handler kun om likevektstilstander før og etter at varme eller arbeid har gjort sitt. Ikkeliikevekts termodynamikk (hvis far kan sies å være nordmannen Lars Onsager) omhandler transportprosessene og tar utgangspunkt i vår empiriske kunnskap. For varme sier den at

$$\vec{J}_q = -\lambda \nabla T, \quad (10)$$

der \vec{J}_q er varmekraften (varmeenergi transportert per tids- og flateenhet) og λ er varmeledningsevnen. Varmeledningligningen (10) sier at jo varmere ovnen er og jo nærmere du går, dess forttere blir du varm. (Dette er forøvrig et eksempel på at dagligspråket ikke alltid skiller mellom temperatur og varme.) Varmekraft kan man ikke måle direkte, så for å få et uttrykk for hvordan temperaturen varierer med tid når det strømmer varme bruker man energibevaring (kontinuitetsligningen $\partial Q / \partial t = -\nabla \cdot \vec{J}_q$) for å uttrykke:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = D \nabla^2 T, \quad (11)$$

der $D = \lambda / (c_p \rho)$ er den termiske diffusiviteten. Vi skal i laboratorieøvingen måle D for et metall.

1. Å planlegge et eksperiment

Varmeledningsevnen og varmekapasiteten til for eksempel rent aluminium er godt kjent. Kommersiell tilgjengelig aluminium, derimot, kan ha urenheter og kornstruktur som gjør at materialeegenskapene er forskjellige. Dersom vi ønsker å bestemme termisk diffusivitet til en bestemt type metall på en enkel, men presis måte, må vi tenke gjennom hvordan eksperimentet bør gjøres. Det vi trenger er 1) et metallstykke i en ønsket form og

størrelse 2) En måte å lage en kontrollert varmestrøm i materialet 3) temperatursensorer.

Vi tar først utgangspunkt i de 5 temperatursensorene hver gruppe har: 2 termistorer og to termoelement-kontakter, alle med en diameter på < 2 mm og et IR-termometer, alle sensorene med en nøyaktighet og presisjon på ± 0.2 K dersom man er nøye med bruken. Dersom vi ønsker å måle temperaturen på flere “punkter” i en prøve med temperaturgradienter må prøven være mye større enn sensorene i retningen til temperaturgradienten for at målingen skal være en god tilnærming til en punktmåling. Det vil si at avstanden mellom hver sensor bør være minst 20 mm.

Formen på prøven og hvordan sette opp varmestrømmen bestemmer initial- og grensebetingelsene (IB og GB) når vi skal løse diffusjonsligningen (11) for å lage en tilpasningsmodell til måledataene våre. Det er to ting som kan gjøre livet vårt lettere her: 1) Prøv å redusere problemet til å bli endimensjonalt, for eksempel at varmetransporten bare foregår i x -retning og ikke i y - og z -retning. Det er to måter å gjøre dette på: gjør x -retningen liten i forhold til y - og z -retningene og mål midt i yz -planet, eller isoler prøven i y - og z -retningene. Hvis vi skal ha 5 sensorer på linje med minst 20 mm mellom blir prøven minst 100 mm i x -retningen. Hvis prøven skal være mye større i yz -planet blir det en alvorlig stor aluminiumsklump! Vi satser derfor på å isolere godt! Varmeledningsevnen til et godt isolasjonsmateriale er omlag som den for luft, det vil si 10000 ganger lavere enn for aluminium. 2) Finn IB og GB som gir en analytisk løsning av differensialligningen. Vi finner en løsning av diffusjonsligningen (11) for en uendelig lang stang $0 \leq x < \infty$ for tider $0 < t < \infty$ med IB $T(x, t = 0) = T_0$ og GB $T(0, t) = h(t)$:

$$T(x, t) = T_0 + \int_0^t \frac{x}{\sqrt{4\pi D(t-s)^3}} \exp\left(\frac{-x^2}{4D(t-s)}\right) h(s) ds \quad (12)$$

Dersom man klarer å holde konstant temperatur ved endepunktet gjennom forsøket, $h(t) = T_1 = \text{konstant}$, $\Delta T = T_0 - T_1$ så lar ligningen seg løse analytisk:

$$T(x, t) = T_1 + \Delta T \operatorname{erf}\left(\frac{x}{\sqrt{4Dt}}\right), \quad (13)$$

$$\operatorname{erf}(\eta) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\eta e^{-\kappa^2} d\kappa. \quad (14)$$

En viktig kvalitet ved denne løsningen er at de to variablene x og t nå er kombinert i en variabel: $\eta = x/\sqrt{4t}$. Det betyr at forskjellige temperaturkurver kan reduseres til en eneste kurve. Det gjenstår fortsatt en del praktiske spørsmål:

- Hvilken diameter i yz -planet er optimalt?
- Hvor lang må en stav være (i x -retning) for at vi kan regne den som “uendelig lang”?
- Hvordan skal vi sørge for å holde konstant temperatur i $x=0$ som grensebetingelsen grever?

- Hvordan går vi frem for å sikre at prøven tilfredsstiller initialbetingelsen, dvs lik temperatur i hele staven.

II. PRELAB

Prelaboppgavene finner du som vanlig på Fronter. Det er maksimalt 20 oppnåelige poeng, strykgrensen er 15 poeng. Spørsmålene må besvares innen klokken 12 dagen før laboratorieøvelsen. I dette avsnittet vil du finne litt informasjon som trengs for å løse prelaben.

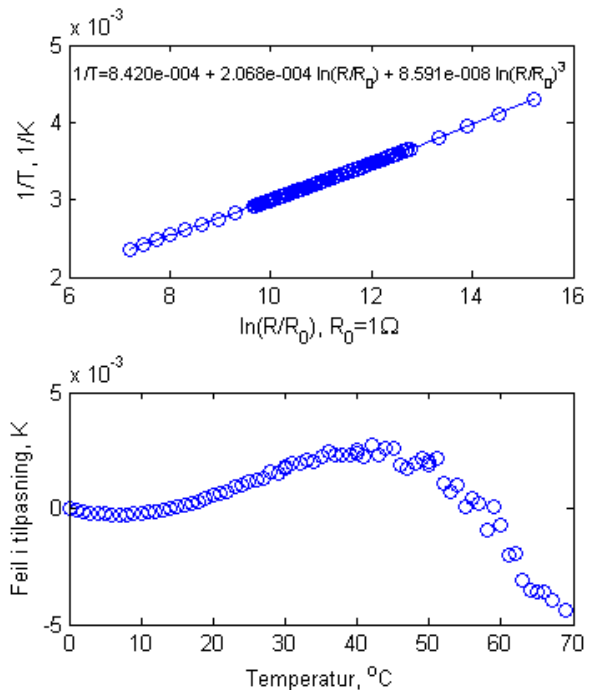


FIG. 3: Tilpasning av Steinhart-Hart-ligningen til kalibreringsdata (accucurve1.dat og accucurveW.dat) for termistorene brukt i denne labben. Nederste figur viser at avviket mellom tilpasning og data er mindre enn 0.05 K for alle temperaturer mellom 0 og $70^{\circ}C$.

Termistorene vi bruker har typebetegnelsen ACWX-007 (se `accucurve_RTI.pdf`), det vil si at $R(T = 25^{\circ}C) = 100k\Omega$, og avviket fra temperaturverdiene i kalibreringsdataene (accucurve1.dat og accucurveW.dat) er maksimalt $\pm 0.2^{\circ}C$. Figur 3 viser resultatet av tilpasning av ligning 1 til kalibreringsdata. Figuren er resultatet av skriptet `accucurve.m`. Hvis du kjører skriptet ligger tilpasningsparametrene i variabelen `b`. Hvis du f.eks. vil se 10 gjeldende siffer av `b` skriver du `num2str(b, '%1.10d')`.

Feilfunksjonen $\operatorname{erf}(\eta)$ (ligning (14)) som inngår i løsningen (13) av diffusjonsligningen med de IB og GB vi valgte er så viktig i flere sammenhenger at Matlab har både den

III. LABORATORIEØVING

A. oppgave: Termoelement og termistor

a. Målinger Hver gruppe har fått et termoelement av type T (kopper og konstantan) der koppertråden er koblet til bananbøsninger og to ender er tvunnet sammen til en kontakt mellom kopper og konstantan. Dere skal bruke et labmultimeter til å måle termospenningen, ΔU . Hver gruppe har fått to termistorer. Dere skal bruke to håndholdte multimeter til å måle motstanden, R_T . Husk at dere måler temperatur i sensoren og at termisk likevekt med det dere ønsker å måle temperaturen til er avgjørende. Bruk varmeledingspasta, men pass på å tørke opp alt søl underveis og etterpå.

- Lag et hull med en loddebolt på oversiden av to isbiter. Stikk endene av termoelementet ned i hullet på hver sin isbit. Mål termospenningen, ϵ_T . Hva forventer du? Hva måler du?
- Fest den ene enden til den kubiske aluminiumsklossen montert på bordet med modellkitt og evt. tape mens den andre enden forblir i isbiten. Mål termospenningen. Endrer den seg med tid? Hvorfor?
- La den ene enden av termoelementet forbli klistret på aluminiumsklossen.
- Fest to termistorer til den kubiske aluminiumsklossen med modellkitt og evt. tape. Mål motstandenene, R_T . Hvor lang tid tar det før målingene stabiliserer seg? Har de to termistorene den samme motstanden?
- Når alle avlesninger har stabilisert seg, mål R_T og mål ϵ_T mellom aluminiumskloss og isbit igjen.
- La en av termistorene forbli klistret til aluminiumsklossen.

b. Beregninger

- Skriptet `type_t.m` plotter standarddata for type T termoelementer fra NIST. Bruk denne kurven til å lage en funksjon $T(\epsilon_T)$. Produsenten av termoelement-tråden leverte en kalibreringsanmerking: "Wire had a deviation of -0.6F at 212F". Medfører det en signifikant korreksjon til temperaturfunksjonen deres, $T(\epsilon_T)$?
- Beregn temperaturen til aluminiumsklossen fra den målte termospenningen.
- Dere har i prelab-en laget deres eget lille Matlab-skript for å beregne temperatur som funksjon av motstanden, $T(R_T)$ til termistorene. Finn temperaturen til aluminiumsklossen målt med de to termistorene.

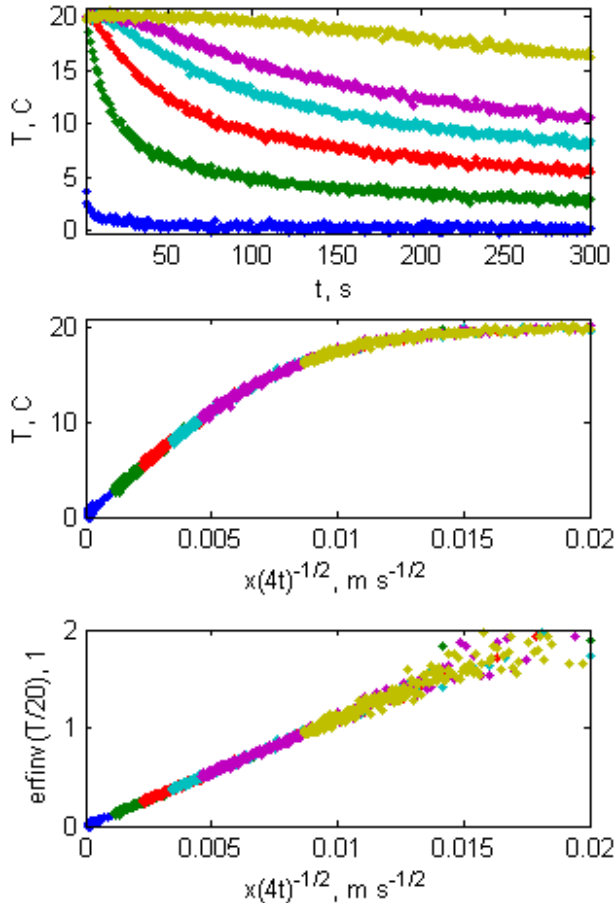


FIG. 4: Syntetisk temperaturdatasett fra et planlagt diffusjonseksperiment. **Øverst:** Temperaturer $T(t; x_i)$ som funksjon av tid tatt opp av sensorer under et varmeledningseksperiment. Sensorene var plassert i forskjellige posisjoner $x_i = \{0.3, 4, 8, 12, 16, 30\}$ cm. **Midterst:** Samme datasett som over men temperaturen er plottet som funksjon av diffusjonskoordinat $\eta = x_i/\sqrt{4t}$. **Nederst:** Invers feilfunksjon på normaliserte temperaturdata som funksjon av diffusjonskoordinat $\eta = x_i/\sqrt{4t}$. Samme datasett som over.

(`erf`) og den inverse feilfunksjonen (`erfinv`) innebygget. Det er veldig praktisk når vi har et datasett med temperaturer $T(t; x_i)$ som funksjon av tid tatt opp av sensorer plassert i forskjellige posisjoner x_i som i figur 4. Der-som man i ligning (13) flytter T_0 og ΔT over på venstre side kan man ta den inverse feilfunksjonen erf^{-1} på begge sider av ligningen og få:

$$\text{erf}^{-1}\left(\frac{T(x_i, t) - T_1}{\Delta T}\right) = D^{-1/2} \cdot \eta, \quad \eta = \frac{x_i}{\sqrt{4t}} \quad (15)$$

- Stemmer $T(R_T)$ og $T(\epsilon_T)$ overens? Kommenter?
- Hva er nøyaktighet, presisjon og hovedfeilkilder til disse målingene?

B. oppgave: IR-termometer

Dere skal bruke et IR-termometer til å måle temperaturen til forskjellige ting i rommet. Blant annet skal dere bruke Leslie's kube som har stabil temperatur og fire overflater med forskjellig emmissivitet. Temperaturen til Leslie's kube måles med en termistor som kan avleses med et multimeter. Kalibreringskurven er angitt på kubens og i databladet på fronter.

- Bruk IR-termometret til å måle temperaturen i rommet. Dere må selv definere målingen deres. Noter bl.a. hva dere måler på og hvordan (avstand og vinkel).
- Mål temperaturen til aluminiumsklossen med IR-termometret mens dere varierer vinkel, avstand og "reflektert bakgrunn". Stemmer målingene med termistormålingen av temperaturen til aluminiumsklossen? Hvorfor/ hvorfor ikke?
- Mål temperaturen til Leslie's kube med den innebygde termistoren og med IR-termometret på hver av de fire flatene. Gi en kvalitativ forklaring av resultatene. Kan du bestemme emmissiviteten kvantitativt?
- Bruk den matte flaten på Leslie's kube, de termistorer og ligning 8 til å beregne emmissiviteten til den (blanke) kubiske aluminiumsklossen. Anta at emmissiviteten til den matte, svarte flaten på Leslie's kubeer omtrent 0.95.
- Kommenter feilkilder og usikkerheter.

C. Varmedledning i en metallstang

Nå skal dere måle termisk diffusivitet i en metallstang. Teorien er allerede kjent, og dere har gjort noen beregninger på lignende data i prelaben. Det er viktig at dere tenker nøye gjennom hvordan dere skal gjøre forsøket før dere starter, for det tar lang tid før dere kan gjenta det hvis noe skulle gå galt. Det kan også bidra til store usikkerheter. Når dere tar i stanga, så husk at fingrene deres er varme.

- Bestem posisjonen til hullene der temperatursensorene skal plasseres
- Velg selv hvilke temperatursensorer som plasseres hvor.
- Koble termistorene og termoelementet til breadboardet, koble opp referansemotstander, utspenning og alle innspenningene til akvisisjonsboksen

NI USB-6211. Det er lurt å tegne dette opp først for å planlegge koblingene.

- Lag et dataloggings-script basert på de scriptene dere har brukt i øving 1-4.
- Anslå hvor lenge eksperimentet vil vare og sett opp dataloggings-scriptet til å ta opp data minst tre ganger så lenge. (Det er lettere å avbryte det enn å skaffe mer data.)
- Start dataloggingen og la den gå en stund før dere bruker is til å starte eksperimentet. Forsikre dere om at temperaturen i staven er homogen og stabil.
- Beregn termisk diffusivitet for metallstaven.
- Var usikkerhetene mest påvirket av tilfeldige eller systematiske feil?
- Hvordan ville du endre designen på eksperimentet for å få enda mer nøyaktige og presise resultat?

IV. UTSTYRSLISTE

- Væsketermometer med kalibreringssertifikat
- Termoelement
- To termistorer
- To håndholdte multimetre
- Varmedledningspasta
- Loddebolt
- Isbiter
- Pappkopp med lokk
- Modellkitt
- Tape
- IR-termometer
- Leslie's kube
- Breadboard
- Akvisisjonsboks NI USB-6211
- Løse ledninger
- Metallstav med isolasjon og isbitholder
- Tommestokk