

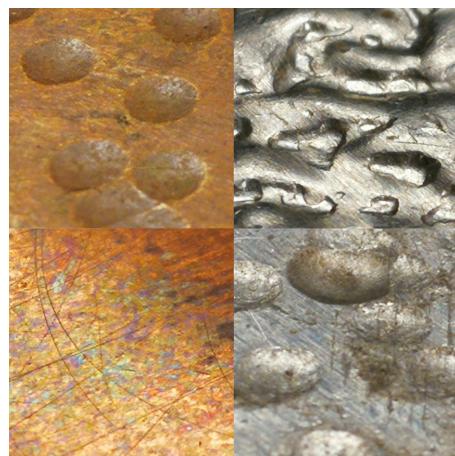
Bestämning av solabsorptionskoefficient och emissivitet för olika aluminium- och kopparfytor samt absorptionens våglängdsberoende

Oscar Eriksson (oscerik@student.chalmers.se) och
Nils Patriksson (panils@student.chalmers.se)

28 januari 2020

Sammanfattning

I den här studien användes en halogenlampa för att bestämma solabsorptionskoefficient α_s och emissivitet ϵ för aluminium- och kopparplattor med olika ytstruktur. För att undersöka absorptionens våglängdsberoende mättes även absorptionskoefficienten α för en polerad aluminiumplatta vid belysning av en glödlampa samt en svartkroppsstrålande ugn. Studien utgår från tidigare framtagen metod av S. Löfving [1] där koefficienterna bestäms genom att betrakta energikonservering precis då belysning startar och då belysning avslutas. Mätningarna resulterade i högre solabsorptionskoefficient för koppar än för aluminium. För båda materialen var emissiviteterna likartade men både α_s och ϵ antog högsta värdet för de grövre ytorna. Resultatet med ugn och glödlampa som strålningskällor tyder på sambandet att längre våglängd på strålningen ger lägre absorptionskoefficient för aluminium. Osäkerheterna i koefficientvärdena relaterades främst till att trycket i vakuumkammaren ej blev tillräckligt lågt, vilket bör beaktas vid vidare studier.



Innehåll

1 Inledning	1
2 Bakgrund och teori	1
2.1 Absorption och emission hos tunna plattor	1
2.2 Ljuskällans påverkan på absorptionskoefficenten	2
3 Försöksuppställning	3
3.1 Val av absorptionsplattor	3
3.2 Uppställningen med halogenlampa	3
3.3 Uppställningen med glödlampa svartkroppsstrålande ugn	4
4 Utförande	4
4.1 Temperaturmätningen	4
4.2 Bestämning av solabsorptionskoefficient α_s och emissivitet ϵ med halogenlampa	5
4.3 Beräkning av absorptionskoefficent α med IR-strålning	5
5 Resultat	6
5.1 Solabsorptionskoefficient och emissivitet med halogenlampa	6
5.2 Absorptionskoefficienter med glödlampa svartkroppsstrålande ugn	6
6 Diskussion	7
6.1 Systematiska felkällor	7
6.1.1 Intensitetsvariationer i ljuskällorna	7
6.1.2 Konvektion och konduktion	8
6.2 Uppskattning av maxfelet	8
6.3 Slutsatser	9
Referenser	10
A Uppskattade mätosäkerheter och typiska mätvärden	11
B Labblogg	13

1 Inledning

Att mäta ytors emissions- och absorptionsförmåga vid infallande elektromagnetisk strålning ligger till stor vikt vid till exempel framtagning av bas- och ytmaterial för solfångare. Där eftersträvas en yta som absorberar stor del av den infallande solenergin och samtidigt har en liten värmestrålning jämfört med en svartkropp. Med olika ytstrukturer och material kan solfångares effektivitet optimeras.

En metod för att bestämma en ytas solabsorptionskoefficient α_s och emissivitet ϵ beskrivs av Lövfing [1] där temperaturförändringar i ytan observeras vid belysning av en halogenlampa som simulerar solspektrumet. I denna rapport undersöks möjligheten att använda samma metod för att bestämma α_s och ϵ för aluminium och kopparplattor med olika ytstruktur.

Andra tillämpningar då materials absorptionsegenskaper är viktigt är i skydd från strålning. Exempelvis kan man vilja skydda känslig mätutrustning från värmestrålning. Man kan också vilja maximera reflektionen av värmestrålning för att kunna fokusera strålningen. För mer långvägg värmestrålning kan absorptionsegenskaperna för materialet vara annorlunda. Därför har även absorptionskoefficent α undersökts för en polerad aluminiumplatta bestrålad av en ugn samt en glödlampa som avger mycket infraröd strålning.

2 Bakgrund och teori

2.1 Absorption och emission hos tunna plattor

Då en absorptionsplatta¹ belyses med elektromagnetisk strålning med effekt P erhålls genom energikonservering att

$$c_p m \dot{T} = \alpha_s P - A \epsilon \sigma (T^4 - T_0^4) - \sum_i A_i \epsilon_i \sigma (T^4 - T_0^4) - P_l \quad (1)$$

där vänsterledet betecknar förändringen i värmekonsept i plattan. Högerledet innehåller inkommande strålning från ljuskällan, utgående strålning från plattan i enlighet med Stefan-Boltzmanns lag och en korrektionsterm för värmekonvektion och konduktion. Plattans framsidas ytarea betecknas A , massan m , specifik värmekapacitet c_p och temperatur T . T_0 är omgivningens temperatur, σ Stefan-Boltzmanns konstant och P_l står för en korrektionsterm. Summationstermen tar hänsyn till värmestrålningen från plattans ej belysta ytor med area A_i och emissivitet ϵ_i . Om temperaturen mäts direkt då plattan börjar belysas gäller $T \approx T_0$ vilket gör att värmeförluster genom strålning, ledning och konvektion kan försummas. Solabsorptionskoefficienten kan då fås ur ekvation (1) som

$$\alpha_s = \frac{c_p m \dot{T}}{AP}. \quad (2)$$

¹En tunn kvadratisk bit av ett material med en viss ytbeläggning

Efter en tid av belysning har plattans temperatur ökat så att $T \neq T_0$. Genom att avbryta belysningen ($P = 0$) kan då plattans emissivitet erhållas ur ekvation (1) som

$$\epsilon = -\frac{c_p m \dot{T} + \sum_i A_i \epsilon_i \sigma(T^4 - T_0^4) + P_l}{A \sigma(T^4 - T_0^4)}. \quad (3)$$

Om plattans baksida har samma emissivitet som framsidan gäller att termen för värmestrålningen är approximativt identiskt med den från framsidan. För värmestrålningen från plattans kanter så ansätter vi där en total area A_k och emissivitet ϵ_k . Ekvation (3) utvecklas då till

$$\epsilon = -\frac{c_p m \dot{T}}{2A \sigma(T^4 - T_0^4)} - \frac{A_k \epsilon_k}{2A} - \frac{P_l}{2A \sigma(T^4 - T_0^4)}. \quad (4)$$

Emissiviteten ϵ_k för kanterna kan antas vara $0,2 \pm 0,1$, vilket är ett typiskt värde för grova metallytor [1]. De främsta värmeleddningsförlusterna i P_l -termen är de via luften och genom de metalltrådar som plattan är fäst i. Värmekonvektion via luften behöver minimeras genom att minimera lufttrycket runt plattan. I metalltrådarna kan värmelägningen uppskattas med formeln för ledning genom en tunn oändlig tråd,

$$P_t = \sqrt{4\sigma \epsilon_t \lambda r^3 \left(\frac{T^5}{5} - TT_0^4 + \frac{4T_0^5}{5} \right)} \quad (5)$$

där λ är värmelägningsförmåga för materialet i tråden, ϵ_t emissivitet för trådens yta och r trådens radie [2].

2.2 Ljuskällans påverkan på absorptionskoefficenten

Olika ljuskällor kan ge olika absorptionskoefficenter. Dels påverkar deras intensitet men även ljusets våglängd. Exempelvis har solens strålning sitt spektrala maxima i det synliga ljuset. En glödlampa eller halogenlampa har inte samma spektrum som solen [3]. Man kan approximera ljuskällors spektra med Plancks lag som lyder

$$de = \frac{8\pi hc_0}{\lambda^5} \cdot \frac{d\lambda}{\exp\left(\frac{hc_0}{kT\lambda}\right) - 1}. \quad (6)$$

Från detta kan man härleda ett maxima för spektrat som kan beskrivas som

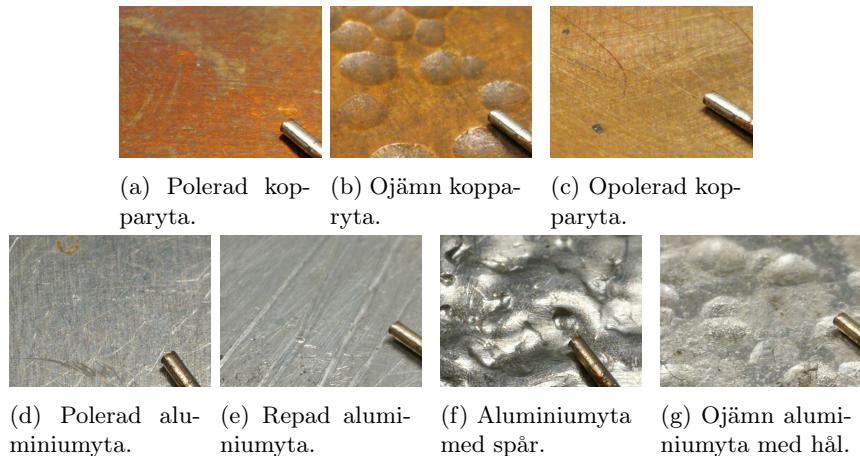
$$\lambda_m T = b_\lambda \quad (7)$$

där λ_m är våglängden för maximat och $b_\lambda = 2,8978 \cdot 10^{-3}$ [4]. Med hjälp av exempelvis en IR-kamera som mäter temperaturen så kan spektrat bestämmas ungefärligt för olika strålningskällor.

3 Försöksuppställning

3.1 Val av absorptionsplattor

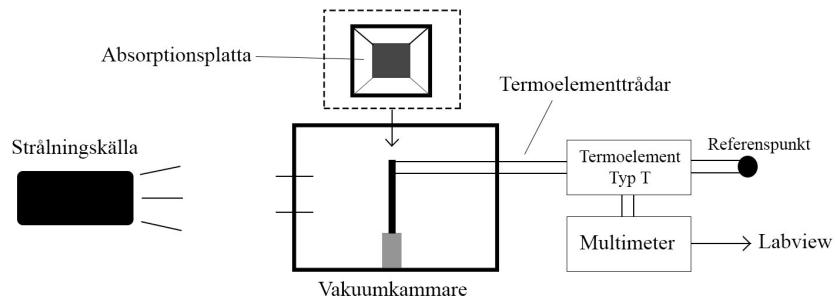
Mätningar gjordes på tre kopparplattor och fyra aluminiumplattor med olika ytbeläggning. Bilder på plattorna visas i figur 1 där ytbeläggningen framgår.



Figur 1: Bilder på aluminium- och kopparplattorna. Metallcylindern i bilderna har diameter 0,5 mm.

3.2 Uppställningen med halogenlampa

Provplattorna placerades i en vakuumkammare med ett tryck som understeg 2 Pa. Temperaturen i rummet var cirka 22 °C. Lampan riktades mot provplattorna genom ett glasfönster på vakuumkammaren. Schematisk skiss av uppställningen visas i figur 2. Temperaturen mättes med termoelementtrådar



Figur 2: Uppställningen där absorptionsplatta placerad i en vakuumkammare belyses av en strålningskälla. Plattans temperatur bestäms via termoelementtrådar där genererad spänningsskillnad mellan plattan och en referenspunkt registreras i Labview via multimeter.

av typ T. Referenspunkten för termoelementtråden var 0-gradigt isvatten. Effekt från det infallande ljuset uppmättes med en Ophir 12A strålningsefektmätare med kapacitet att mäta våglängder i intervallet $0,19 \mu\text{m} - 20 \mu\text{m}$ [5].

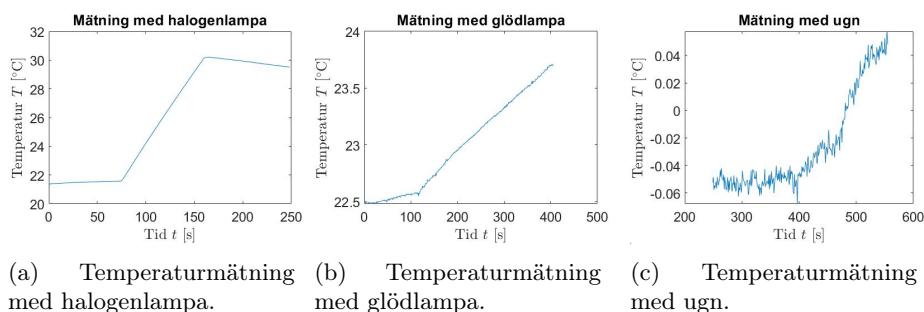
3.3 Uppställningen med glödlampa svartkroppsstrålande ugn

För att undersöka absorption av IR-strålning testades en glödlampa och en ugn som strålningskälla. Mätningarna gjordes här endast på den polerade aluminiumplattan, figur 1d. Med glödlampen var uppställningen identisk med den för halogenlampan. Med ugnen användes rumstemperaturen som referens istället för isvatten på grund av att temperaturen var tvungen att vara precis rumstemperatur för att minimera utstrålningen från plattan. Strålningskällan gav låg effekt varför alla andra värmetransporter var tvungna att minimeras. Uppställningen är i övrigt samma som figur 2.

4 Utförande

4.1 Temperaturmätningen

Inför experimenten bestämdes plattornas dimensioner och vikt. Med varje strålningskälla mättes inledningsvis den infallande effekten P vid plattan från strålningskällan. Vid mätning placerades en platta i vakuumkammaren varefter trycket sänktes till under 2 Pa . Därefter startades temperaturmätningen och strålningskällan tändes. Plattornas temperatur registrerades varje sekund och värmdes till maximalt 30°C då strålningen avslutades. För behandling av data och beräkning användes MATLAB. I figur 3 visas typiska utseenden för temperaturmätningarna med respektive strålningskälla.



Figur 3: Typiska temperaturmätningar som uppmätts med de olika strålningskällorna. Observera att i 3a och 3b är referenspunkten i 0°C isvatten. För 3c är den mätta temperaturen skillnaden mellan rumstemperatur och plattempetur.

4.2 Bestämning av solabsorptionskoefficent α_s och emissivitet ϵ med halogenlampa

Plattorna, figur 1, värmdes från rumstemperatur till cirka 30 °C. Solabsorptionskoefficenten beräknades från ekvation (2) där derivatan \dot{T} bestämdes genom medelvärdesbildning över ett visst antal punkter n direkt efter att lampan slagits på. Med halogenlampan var temperaturökningen tydlig, se figur 3a, och n valdes där till 15 punkter. Derivatorna \dot{T} för de n punkterna t_i approximerades numeriskt med en central differenskvot till noggranhetsgrad 8 [6]:

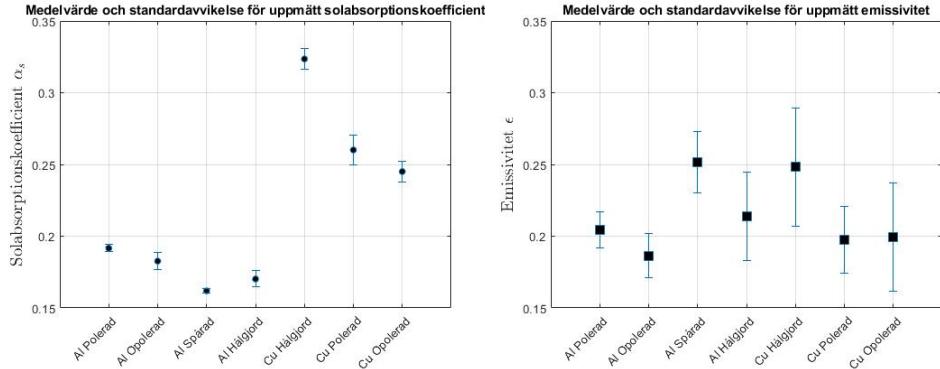
$$\begin{aligned}\dot{T}(t_i) \approx & \left[\frac{1}{280}T(t_{-4}) - \frac{4}{105}T(t_{-3}) + \frac{1}{5}T(t_{-2}) - \frac{4}{5}T(t_{-1}) \right. \\ & \left. + \frac{4}{5}T(t_1) - \frac{1}{5}T(t_2) + \frac{4}{105}T(t_3) - \frac{1}{280}T(t_4) \right] / t_h.\end{aligned}\quad (8)$$

Här motsvarar indexen antal steg från punkt t_i och t_h är steglängden mellan punkterna.

Emissiviteten beräknades från (3) där \dot{T} bestämdes på samma sätt som för α_s med $n = 15$ punkter vid temperaturen 30 °C för aluminiumplattorna och vid 30-34°C för kopparplattorna.

4.3 Beräkning av absorptionskoefficent α med IR-strålning

För detta gjordes först ett test med en glödlampa som till skillnad från halogenlampan avger mycket IR-strålning [7] [8]. Absorptionskoefficienten beräknades här på samma sätt som med halogenlampa och med samma antal punkter n för derivatan \dot{T} . Se figur 3b för typisk mätning med glödlampan. Därefter byttes lampan ut mot en ugn som strålningskälla. Eftersom glaset till vakuumkammaren absorberar mycket IR-strålning så belystes inte glaset mer än 3 minuter åt gången. Vid olika temperaturer i omfånget 300 °C till 520 °C gjordes mätningar på samma sätt som för glödlampan och halogenlampan. Ugnstemperaturen mättes med värmekamera som var inställd på emissivitet 1. Strålningsintensiteten mättes med samma utrustning som tidigare separat för varje mätning eftersom intensiteten beror av ugnstemperaturen. Här observerades en betydligt instabilare temperaturökning, se figur 3c, och derivatan \dot{T} var inte lika väldefinierad för ett visst antal punkter n för varje mätning. Därför varierades antal punkter n för att approximera \dot{T} så noggrant som möjligt för varje mätning.



(a) Beräknad solabsorptionskoefficient α_s för samtliga testplattor i figur 1 med halogenlampa som strålningskälla.
(b) Beräknad emissivitet ϵ för samtliga testplattor i figur 1 med halogenlampa som strålningskälla.

Figur 4: Resultatet från mätningen med halogenlampan som strålningskälla. Markeringen är medelvärdet från de tre mätningarna som gjordes på varje platta och felsmarginalerna visar standardavvikelsen.

5 Resultat

5.1 Solabsorptionskoefficient och emissivitet med halogenlampa

I figur 4 visas medelvärden och standardavvikelse för beräknade solabsorptionskoefficienter och emissiviteter från mätningarna med halogenlampan och plattorna i figur 1. Här kan det ses att de beräknade solabsorptionskoefficienterna, figur 4a, är högre för kopparplattorna än för aluminiumplattorna. För respektive metall har också de grövre ytorna (hälgjord och spårad) resulterat i lägre α_s än för resterande ytor (polerad och opolerad).

Metallernas emissiviteter, figur 4b, har resulterat i något likartade värden. Även här syns dock också att något högre värden noterats för de grövre ytorna. Notera att standardavvikelserna från emissiviteterna är högre än för solabsorptionskoefficienterna. Detta beror förmögligen på ett antal felkällor som endast påverkar emissivitetsmätningarna. Detta beskrivs utförligare i diskussionen.

5.2 Absorptionskoefficienter med glödlampa svartkroppsstrålande ugn

Med glödlampen gjordes två mätningar på den polerade aluminiumplattan med en effekt $P \approx 77 \text{ W m}^{-2}$ där värdena $\alpha = 0,12$ och $\alpha = 0,15$ erhölls. Den våglängd där strålningsintensiteten för en vanlig glödlampa är maximal är cirka $\lambda_m \approx 0,8 \mu\text{m}$ [8].

I tabell 1 visas beräknade värden för absorptionskoefficienten α på samma

Ugnstemperatur, T [°C]	320	385	400	420	475	520
Våglängd för spektrats maximum, λ_m [μm]	4,9	4,4	4,3	4,2	3,9	3,5
Intensitet vid plattan, P [Wm ⁻²]	18	29	40	45	77	124
Beräknad absorptionskoefficent, α	0,011	0,017	0,025	0,021	0,022	0,023

Tabell 1: Uppmätt absorptionskoefficient α för polerad aluminiumplatta, figur 1d, vid olika temperaturer T med ugn som strålningskälla. I rad 2 visas även uppmätt effekt P för respektive temperatur.

platta med strålning från ugn vid olika temperaturer. De uppmätta värdena för α är betydligt mindre än α_s med halogenlampen.

6 Diskussion

6.1 Systematiska felkällor

6.1.1 Intensitetsvariationer i ljuskällorna

Variationer i ljusintensiteten från halogenlampen och glödlampen var små vilket observerades under mätning av intensiteten. Under tändningen av lamporna ökade intensiteten under några sekunder men mätningen pågick under flera minuter vilket gjorde att effekten var ungefär konstant under hela mätningen.

Ugnen var igång hela tiden vilket gjorde att den strålingseffekten hölls konstant i största möjliga utsträckning. Temperaturen kunde dock variera cirka 10 °C under en mätning. Om man antar att effekten kan skrivas enligt Boltzmanns lag så fås att andelen variation i intensitet blir

$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{\epsilon\sigma AT_0^4}{\epsilon\sigma A\delta T^4} \approx \frac{610^4}{600^4} \approx 1,07. \quad (9)$$

Alltså påverkar intensitetsvariationen mätningen med maximalt 7% då absorptionskoefficenten är omvänt proportionell mot den uppmätta effekten.

Något som även kan ha påverkat mätningarna är mätutrustningen för intensiteten. Denna mätte i intervallet 0,19 μm - 20 μm. Fördelningen av strålningen kan bestämmas ungefärligt med Plancks lag förskjutningslag i ekvation (6). Endast en del av strålingsspektrat kommer detekteras av intensitetsmätaren. Andelen kan beräknas genom att integrera över dels det mätbara intervallet och även över ett mycket större intervall för att se hur stor effekt som ej detekterats. Uttrycket i ekvation (10) har integrerats med hjälp av MATLAB, de är samma som i ekvation (6).

$$\frac{\int_{0,19\text{ }\mu\text{m}}^{20\text{ }\mu\text{m}} \text{de}(T = 300\text{ }^\circ\text{C})}{\int_0^{20} \text{de}(T = 300\text{ }^\circ\text{C})} \approx 94\% \quad (10)$$

Alltså kommer felet på absorptionskoefficenterna från denna felkälla vara cirka 6% eftersom α är omvänt proportionell mot den uppmätta effekten.

6.1.2 Konvektion och konduktion

Konduktionen genom termoelementtrådarna togs hänsyn till genom den korrektionsterm som beskrivs i ekvation (5). Osäkerheter i denna beräkning tas hänsyn till med felfortplantningsformeln i nästa avsnitt. Däremot är en systematisk felkälla konvektionen genom den luft som finns kvar i vakuumkammaren. Effekten av detta kan uppskattas under antagandet att gasen i vakuumkammaren är ideal. Det ungefärliga antalet partiklar i kammaren som träffar en sida av plattan kan uppskattas med hjälp av impulsen på plattan.

$$I = F \cdot \Delta t = P \cdot A \cdot \Delta t = \nu \cdot 2mv_x \quad (11)$$

Kraften F på plattan är per definition $P \cdot A$ [9]. Kraften integrerad över en kort tidsenhet Δt är impulsen I som i sin tur är rörelsemängdsförändringen för partiklar som studsas mot ytan multiplicerat med antalet partiklar ν . Vidare korrelerar temperaturen till partikelenergierna i gasen i en dimension som [9],

$$\frac{mv_x^2}{2} = \frac{kT}{2} \implies m^2\bar{v}_x^2 = kTm. \quad (12)$$

Lägger man ihop ekvation (12) och (11) får antalet partikelkollisioner per tidsenhet som,

$$\dot{\nu} = \frac{PA}{2\sqrt{kTm}} \approx 1,8 \cdot 10^{20} \text{s}^{-1}. \quad (13)$$

Här används massan av N_2 eftersom dessa upptar majoriteten av luften. Om varje partikel maximalt avger energin $3/2 \cdot k \cdot (T_{platta} - T_{luft}) \approx 2,1 \cdot 10^{-22} \text{J}$ [2] vid en temperaturskillnad på 10°C så kommer maximala avgivna energin per sekund bli $E_{max} \approx 38 \text{ mW}$. Detta gäller ungefärligt på båda sidor vilket gör att

$$Q = 2 \cdot 38 \text{ mW} = c_p m \Delta T. \quad (14)$$

Då skulle exempelvis en aluminiumplatta på 60 g värmas cirka $0,0014^\circ \text{C/s}$. Detta har adderats till maxfelet av temperaturderivatan för emissivitetsmätningarna, se appendix A. I annan litteratur, såsom Lövfing [1] och Gordon [2], har samma försök gjorts och konvektionen ej påverkat mätningarna. Skillnaden är att trycket då sänkts till mindre än $0,001 \text{ Pa}$ vilket är avsevärt mycket lägre än vad som var praktiskt möjligt för denna studie.

6.2 Uppskattning av maxfelet

Uppskattning av maxfelet i mätningen av α och ϵ görs med felfortplantningsformeln

$$\Delta y = \sum_{i=1}^n \left| \frac{\partial y}{\partial x_i} \right|_{(c_1, c_2, \dots, c_n)} \cdot \Delta x_i \quad (15)$$

	Lampa	Ugn
Absorptionskoefficent, aluminium	$\Delta\alpha < 0,01$	$\Delta\alpha < 0.01$
Absorptionskoefficent, koppar	$\Delta\alpha < 0,05$	-
Emissivitet, aluminium	$\Delta\epsilon < 0,15$	-
Emissivitet, koppar	$\Delta\epsilon < 0,17$	-

Tabell 2: Beräknade maxfel för de olika mätningarna. Här har även hänsyn tagits till de systematiska fel som identifierats i avsnitt 6.1.

där Δy är felet på det värde som ska bestämmas och x_i är den i :te parametern som ska mätas för att beräkna y [10]. (c_1, c_2, \dots, c_n) är typiska mätvärden för uppställningen och Δx_i är mätsäkerheten för den den i :te parametern. Uppskattade typiska värden och mätsäkerheter från utrustning ges i tabell 3.

Genom att använda ett MATLAB-script så uppskattades max-felet för absorptionskoefficenter och emissivitet. Maxfelen för de olika mätningarna visas i tabell 2. För emissiviteten är de dominerande felkällorna tidsderivatan \dot{T} (felbidrag på 0,06) och vägningen av massan m (felbidrag på 0,04). Att det inte gick att väga plattorna separerat från upphängningen var alltså en stor felkälla. Även lufttrycket på 2 Pa påverkade förmödlig mätningen och andra osäkerheter i temperaturmätningen. För kopparplattorna blev maxfelet större eftersom felet skalar med den specifika värmekapaciteten c_p och massan m . Därmed blev påverkan av osäkerheter i uppmätningen av dessa parametrar för kopparplattorna ännu större. Osäkerheterna verkar stämma med erhållna resultat i figur 4.

Osäkerheterna i absorptionskoefficenter för aluminium och koppar uppvisar samma tendens, att aluminium har mindre osäkerheter på grund av materialparametrarna. Däremot är osäkerheterna mycket mindre jämfört med emissiviteten. För att beräkna α behövdes förra mätningar tas och mindre antaganden göras. Detta syns även i mätvärdena i figur 4 där absorptionsvärdena har mindre spridning än emissiviteterna.

Absorptionskoefficenterna som uppmätttes med ugnen som strålningskälla har små absoluta osäkerheter men eftersom absorptionen är så låg så blir de relativas osäkerheterna stora. Till max-osäkerheten i tabell 2 har även de systematiska felkällor från avsnitt 6.1 räknats med. Dessa ger upphov till cirka 13% fel i intensiteten på strålningen från ugnen.

6.3 Slutsatser

Studien har gett goda resultat för olika aluminium och kopparytors absorptionsegenskaper. I båda fallen verkar en ojämnmare yta ge en annorlunda absorption. I aluminiumfallet verkar en jämnare yta ge högre absorption men skillnaden är inte särskilt stor. I kopparfallet är skillnaden mellan den skrovliga ytan och de två jämnare ytorna större.

Materialet för exempelvis en solfångare väljas med hög absorptionskoefficent men även ytans skrovighet kan påverka absorptionen. I detta specifika fall hade koppar varit ett bra val men även en skrovlig yta hade varit fördelaktigt.

Även emissiviteten påverkar dock om man till exempel ska välja material för en specifik tillämpning. I denna studie har emissiviteten uppmätts vid cirka $30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Båda ämnena har en liknande emissivitet och även den tycks variera vid olika ytstrukturer. Den ojämna kopparytan har exempelvis högre emissivitet än den jämma. Kvoten mellan absorptionskoefficent och emissivitet (α_s/ϵ) blir dock större för den ojämna kopparytan än för den jämma kopparytan. Det tyder på att den ojämna ytan är fördelaktig för exempelvis solfångare. Däremot finns stora avvikelse i emissivitetsmätningarna och fler mätningar med noggrannare vägning och lägre tryck skulle behöva utföras.

Från mätningarna med ugnen som strålningskälla kan dras slutsatser om absorption för strålning med längre våglängd. I ugnsmätningarna var maximum av stråningsspektrat i intervallet $\lambda_m \in [3,5\text{ }\mu\text{m}; 5\text{ }\mu\text{m}]$ jämfört med solljus som har $\lambda_m \approx 480\text{ nm}$. Resultaten tyder på att aluminium har en avsevärt lägre absorptionskoefficent vid längre våglängder. Detta tyder på att aluminium reflekterar stora mängder strålning vid dessa våglängder vilket är fördelaktigt i exempelvis speglar för fokusering av värmestrålning från källor av IR-strålning. Från resultaten skulle också en trend kunna uttydas. Längre våglängder på strålningen tycks ge lägre absorption. Detta stämmer med annan litteratur såsom *Handbook of Optics* av Bass [11] i det givna våglängdsintervallet.

Referenser

- [1] S. Lövling, "Studies on Selective Coatings for Solar Absorbers", *Electron Physics*, nr 11, 1980.
- [2] G. Gordon, "Measurement of Ratio of Absorptivity of Sunlight to Thermal Emissivity", *Review of Scientific instruments*, årg. 31, nr 1, 1960.
- [3] *Tungsten Halogen Lamps Gas Filled Lamps*. URL: <https://www.intl-lighttech.com/specialty-light-sources/tungsten-halogen-lamps-gas-filled-lamps>.
- [4] C. Nordling och J. Österman, *Physics handbook : elementary constants and units, tables, formulae and diagrams and mathematical formulae*. Studentlitteratur, 1987, ISBN: 91-44-16574-9. URL: <http://proxy.lib.chalmers.se/login?url=http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=cat06296a&AN=clc.b1048756&site=eds-live&scope=site>.
- [5] Ophir, *High sensitivity thermal sensors*, Modell 12A och 12A-P, Ophir, aug. 2019.

- [6] *Finite difference coefficient*, dec. 2019. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Finite_difference_coefficient.
- [7] *Incandescent light bulb*, jan. 2020. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Incandescent_light_bulb.
- [8] D. Smith, *Calculating the Emission Spectra from Common Light Sources*, jan. 2016. URL: <https://www.comsol.com/blogs/calculating-the-emission-spectra-from-common-light-sources/>.
- [9] D. Schroeder, *An Introduction to Thermal Physics*. Addison Wesley, 1999, ISBN: 9780201380279. URL: <https://books.google.se/books?id=1gosQgAACAAJ>.
- [10] A. Isacsson, *Föreläsningar i Fysikingenjörens verktyg*, 2013. URL: <https://pingpong.chalmers.se/courseId/8324/node.do?id=3955900&ts=1503582213837&u=-1970986652>.
- [11] M. Bass och O. S. of America, *Handbook of Optics: Fundamentals, techniques, and design*, ser. Handbook of Optics v. 1. McGraw-Hill, 1995, ISBN: 9780070477407. URL: <https://books.google.se/books?id=igNLAQAAIAAJ>.

Appendix

A Uppskattade mätosäkerheter och typiska mätvärden

Tabellen nedan visar uppskattade mätosäkerheter och typiska värden på mätningarna. Vissa data är hämtade från manualer för specifik utrustning. Andra osäkerheter är uppskattade i avsnitt 6.1 medan några osäkerheter är uppskattade efter vad som observerats i labbet.

Osäkerheter från konvektionen från luften i kammaren är adderade till felet i $\dot{m}T$ eftersom att det bidrar till en ytterliggare negativ derivata. Detta tillägg blir nästan lika stort som den mätosäkerhet som kommer från själva mätningen.

Parameter, x_i	Osäkerhet, Δx_i	Typiskt mätvärde/värde, x_i
Plattans specifika värmekapacitet, $c_p^{\text{Al}} [\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}]$	1	385
Plattans massa, m [kg]	$2 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-3}$
Area av plattan, A [m^2]	$5 \cdot 10^{-6}$	$25 \cdot 10^{-4}$
Sidoareor av plattan, A_k [m^2]	$1 \cdot 10^{-6}$	$2,5 \cdot 10^{-5}$
Sampeltemperatur, T [K]	0,1	305
Rumstemperatur, T_0 [K]	0,1	295
Strålningseffekt per kvadratmeter, P [Wm^{-2}]	$3\% = 45$	1500
Strålningseffekt från ugnen per kvadratmeter, P [Wm^{-2}]	$3\% \cdot 6\% \cdot 7\% =$ $= 8,4$	50
Radie av värmceledande uppängning, r [m]	$1 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-4}$
Temperaturderivatan m.a.p. tiden för absorptionsmätningar med lamp-strålningskälla, \dot{T} [Ks^{-1}]	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$9 \cdot 10^{-2}$
Temperaturderivatan m.a.p. tiden för absorptionsmätningar med ugnss-strålningskälla, \dot{T} [Ks^{-1}]	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$9 \cdot 10^{-2}$
Temperaturderivatan m.a.p. tiden för emissivitetsmätningar med lamp-strålningskälla, \dot{T} [Ks^{-1}]	$2,7 \cdot 10^{-3}$	$1,5 \cdot 10^{-2}$
Emittans av kopparledning, e_t^{Cu} [1]	$1 \cdot 10^{-2}$	0,07
Emittans av konstantanledning, e_t^{Const} [1]	$1 \cdot 10^{-2}$	0,09
Värmeledningskonstant koppar, λ_t^{Cu} [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$]	0,1	400
Värmeledningskonstant konstantan, λ_t^{Const} [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$]	0,1	21,2

Tabell 3: Uppskattade mätvärden och mätosäkerheter för de olika mätbara storheterna och tabellyvärdet som används för att beräkna α_s och ϵ .

B Labblogg

På nästa sida börjar labbloggen från laborationsdatumen 2019-12-10 till 2019-12-13.

Labblogg Termodynamik

10/12

11.00 Anländer till labbet.

- Multimeternna fungerar bara med GPIB på mitten datorn.

Kopplar in Ophir strålningsmätare för att bestämma intensiteten från halogenlampa. Bestämmer ett avstånd från lampan där plattorna ska sättas.

Bestämmer platter att undersöka:

Platen är:
3 Cu - platter
3 Al - platter

15.10

Börjar intensitetsmätning

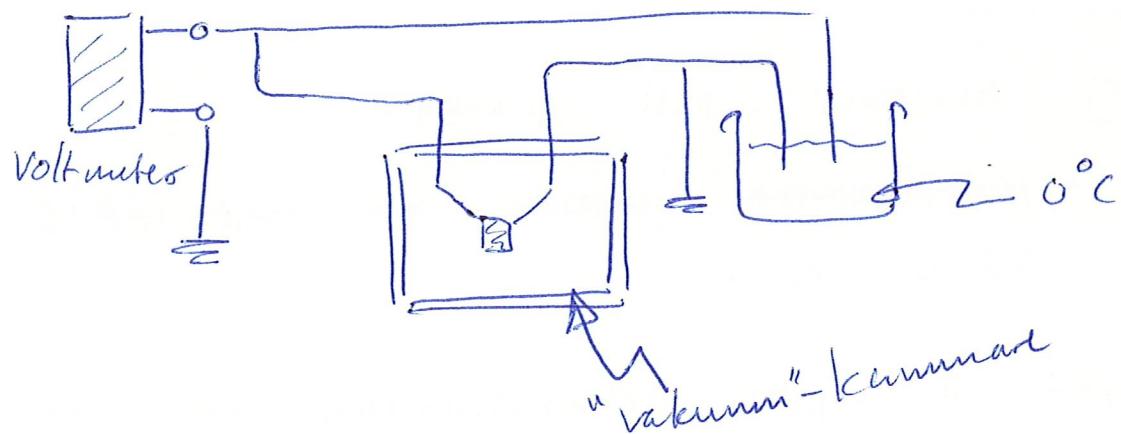
Arean på strålningsmätarspeppningen är $A = \pi (\frac{0,016}{2})^2 \text{ m}^2$

Mäter upp $P_0 = 5 \cdot 10^{-4} \pm 0,5 \cdot 10^{-4} \text{ W}$
utan belysning.

Med belysning $P = \cancel{0,3} 0,3 \pm 0,001 \text{ W}$
(12 V)

$$\Rightarrow P = 1492,1 \pm 4,97 \text{ W/m}^2$$

16:00 Kopplar upp thermocouples enl.



Gör också LabVIEW-program
för extrahering av data.

19:53: Åtit kräffsmat och sedan
förl tempen att funka.

Åter datainsamling till LabVIEW.
Har nollgradigt vatten.

20:20 Kör en test runda. Sprutar till
x/x - höl.

Pump på hela tiden.
Tryck: $\sim 1 \text{ Pa} \pm 1 \text{ Pa}$



Ska rända på termogrejerna för positiva värden nästa gång.

Test 1: Al, stat

$$m = 6,45 + 0,33 \text{ g}$$

$$A = 4,9 \times 4,88 \text{ cm}^2$$

$$C_p = 903 \text{ (från tabell)}$$

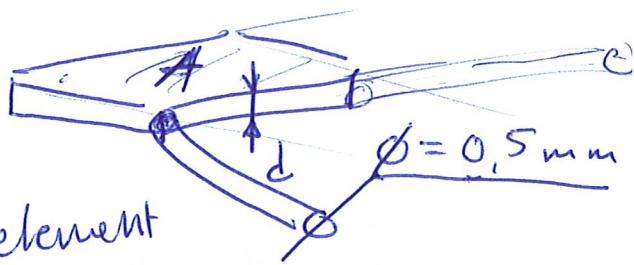
$$d = 0,12 \text{ cm}$$

$$\phi_{cn} = 0,5 \text{ mm}$$

$$\phi_{co} = 0,5 \text{ mm}$$

Diameter
på termo element

Osäkert. Ska fråga
labbassistent
(moogen. Måste
ta bort för att kanna
mäta)



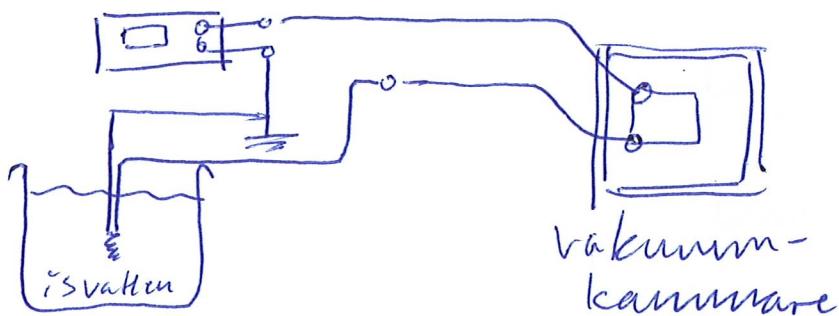
Tömmar tills tryck $\sim 2 \text{ Pa}$.

11/12

8:00:00 Anländer till labbet.

Vi ska nu böja mätet:

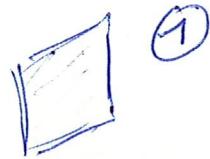
Voltmeter



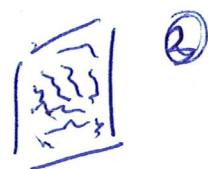
Kolla de isvattnet, var 0,1 grader.

Tømmer → Trykk ~ 2 Pa
Har pump på.

Prov 2: ~~████~~, polerad, Al ①



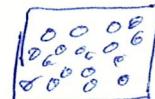
Prov 3: ~~████~~, Al, spårad ③



Prov 4: Al, repad ②



Prov 5 Al, nullad



Prov 6 Al, polerad

Prov 7 Al, spårad

Prov 8 Al, repad

Prov 9 Al, nullad

Prov 10 Al, polerad

Prov 11 Al, spårad

Prov 12 Al, repad

Prov 13 Al, nullad

11.00

Har nu 3 mätningar per platta. Mäter och väger samtliga plattor.

Platta	Massa (g)	Ytarea (cm^2)	Tjocklek (mm)
Polerad	7,05	4,90 x 4,88 5,06 x 5,17	1,2
Repad	13,79	5,00 x 5,03	2,1
Spårad	5,28	5,10 x 5,00	0,8
Rullad	14,53	5,06 x 5,17	2,05

Preliminärt erhåller vi ungefärliga värden som

Platta	α_s	ϵ
Polerad	0,18	0,37
Repad	0,17	0,22
Spårad	0,15	0,44
Rullad	0,17	0,47

13.40

Går över till extrauppgift. Byter ut halogenlampa mot 25 W glödlampa.

$$\text{Mäter upp } P_o = \frac{2,02 \cdot 10^{-2}}{1,54} \pm 0,01 \cdot 10^{-2} \text{ W}$$

$$\Rightarrow P = \frac{P_o}{A} = 76,5933 \text{ W/m}^2$$

V: Flyttade den lite längre ifrån
för att inte få för varmt glas.

14.30

Plättning med lampor på Al, polerad platta

Mätning 1: $\alpha_s \approx 0,17$ (lampa mätning - Alpol 1)

Mätning 2: $\alpha_s \approx 0,17$ (— II — 2)

14:55

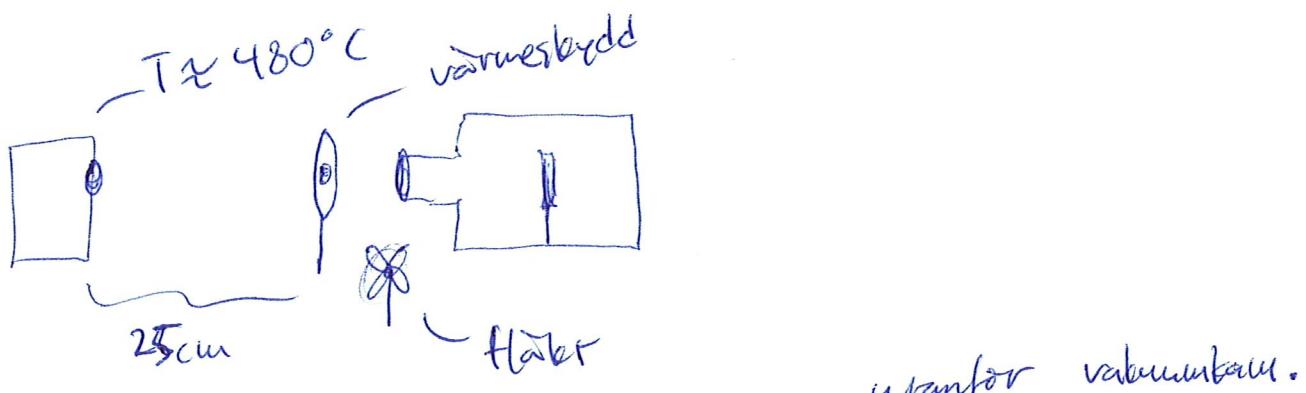
Innogen kor vi ugnen. Har testat
ugnen. Grår upp till iaf 700
grader. Ska kolla effekten absorberad
av glaset innogen.

Grår hem nu pga för lång rymd.

12/12

08.00 Anländer till labbet. Berfar värmen upp
ugnen.

09.25 Förbinder uppställningen. Placerar ugnen
25 cm från glaset. Har nu $T \approx 480^\circ\text{C}$.



Mäter strålningsintensiteten till $P_0' = 7,5 \cdot 10^{-2} \text{ W}$

och $P_0 = 1,3 \cdot 10^{-3} \pm 0,01 \cdot 10^{-3} \text{ W}$

$$\Rightarrow P \approx 6,4657 \text{ W/m}^2$$

09.40

Gör en testurva. Har nu $T \approx 520 \text{ }^\circ\text{C}$

Tömmar till tryck $\sim 2 \text{ Pa}$.

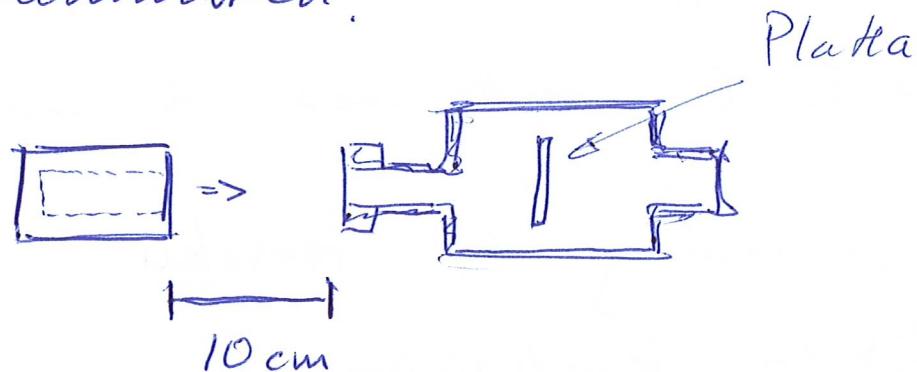
Väntar tills platttemperaturen
ej ändras mer.

Detta är då det är samma
temp. på thermocouplen och
plattan.

Var någon grad skillnad på
luften och thermocouples. ~~sä~~

Detta verkar vara stöcta
läckaget av värme till
plattan.

V: vill linjera ugnen
med ingången på vakuum-
kammaren.



Glaset blir lite varmt men inte
mer än för glödlampan.

Bordet värms lite av ugnen,
forsöker minimera det med
rämeskoldar framför kammaren.

Vill ha:

- Konstant temp. i ugnen.
- konstant spekturm.
- Konstant effekt (väl avstånd,
konstant temp.)
- Samma temp. på platan som
på thermocouples.

10.50

My testmatnings. Mäter $P_0 = 2,50 \cdot 10^{-2} \pm 0,01 \cdot 10^{-2} W$

$$\Rightarrow P = 124,34 \text{ W/m}^2$$

Här nu $T \approx 520^\circ C$ mätt med 2 värmekamrar.

Medans urpumpning så försöker
vi stabilisera temperaturen.

$$T = 514^\circ C$$

$$T = 590^\circ C$$

Tar data:

Ugnsmatning 1: Al, pol.

$$\approx 520^\circ C$$

11.40

Sänkt temp. på ugn till $T \approx 420^\circ C / 435^\circ C$

Mäter $P_0 = 1,02 \cdot 10^{-2} \pm 0,01 \cdot 10^{-2} W$

$$\Rightarrow P \approx 50,73 \text{ W/m}^2$$

Mäter då med
 $\epsilon = 1$ inställt
värmebanor

Ugnsmatning 2: Al, pol

Mäter P i efterhand då temperaturen sjönk.

$$P_0 = 8,10 \cdot 10^{-3} \pm 0,05 \cdot 10^{-3} W$$

$$\Rightarrow P \approx 40,29 \text{ W/m}^2$$

Mäter $T \approx 390^\circ\text{C} / 407^\circ\text{C}$

↑
IR
värmetanera

Vi värmede i 3 minuter ungefärligt.

Glaset blev inte jättevarmt.

Kände med fingret. (30°C enl. värmemätare)

13.40

Ugnsmätning 3: Al, pol.

ungefärligt 450°C , mäter mes noggrant efteråt.

Kör pump till $\sim 7\text{ Pa}$ (minustankade).

Stabiliseras temp.en på plattan.

Se ugnsmätning - Temp Stabilisering 2. x/x.

Efter mätningen mäter vi:

$$P_0 = 1,54 \cdot 10^{-2} \pm 0,01 \cdot 10^{-2} W \Rightarrow P \approx 76,59 \text{ W/m}^2$$

$$T = 475^\circ\text{C} \quad (\text{värmetanera})$$

Ugnsmatning 4:

Tryck $\sim 0,8 \text{ Pa}$

Värmtid: 3 min

$$P_0 = 9,07 \cdot 10^{-3} \pm 0,05 \cdot 10^{-3} \text{ W} \Rightarrow P \approx 45,11 \text{ W/m}^2$$

$$T = 418^\circ\text{C}$$

15:18:

Sänker värmens på ugnen

För att göra två till mätningar

senare:

Så länge måt koppar, olika
ytor också.

Måt P_0 :

Ophir ger: $2,96 \pm 1 \text{ e-1 W}$

$$\Rightarrow P_0 = 0,296 \text{ W} \pm 0,001$$

$$\Rightarrow P_0 \approx ?$$

$$A = \pi \left(\frac{0,016}{2} \right)^2$$

$$\Rightarrow P_0 \approx 2,0106 \text{ e-4 W/m}^2$$

Kopparsplator skall mätsas:

① Polerad Cu:

$$m = 18,8 \text{ g}$$

$$A = 4,99 \times 5,01 \text{ cm}^2$$

$$d = 0,09 \text{ mm}$$

② Oppolerad Cu:

$$m = 44,21 \text{ g}$$

$$A = 5,02 \times 5,01 \text{ cm}^2$$

$$d = 2,00 \text{ mm}$$

③ Halvijord Cu:

$$m = 44,13 \text{ g}$$

Cu-mätning 1:

① mäts, halogen.

Temp. stabiliseras.

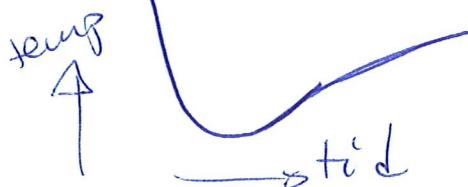
→ matning Cu 1 matning - 6

Cu-mätning 2:

② mäts.

→ matning Cu 2 matning - 7

Parantes:



sällor blir
det om man
har på temperaturkatalog
har man startat
verkamplump. (matning-?)

Cu-mätning 3:

③ mäts.

→ matning 3 matning-7
matning Cu 3

Cu-mätning 4:

① mäts igen.

→ matning Cu 4

Cu-mätning 5:

② mäts igen.

→ matning Cu 5 matning-9

Cu-mätning 6:

③ mäts igen.

→ matning -11

Gjorde fel, Råkade stanna mätningarna
istället för lampan.

Nya toppen syns i \rightarrow matning-12

Cu-mätning 7:

⑦ mäts igen.

\rightarrow matning-13

Cu-mätning 8:

⑧ mäts igen.

\rightarrow matning-14

Cu-mätning 9:

⑨ mäts igen.

\rightarrow matning-16

17:33:

Går tillbaka till extrauppg.

Ugnen är lagom $\approx 300^\circ\text{C}$,

Al, pol igen.

$$P_c = \cancel{3,65} \quad 3,70 \cdot 10^{-3} \pm 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ W}$$

$$\Rightarrow P \approx 18,40 \text{ W/m}^2$$

\rightarrow ugnsmätning-AlPol 15

Temperatur: $\sim 337^\circ\text{C}$

Ny mätning: $T \sim 380^\circ\text{C}$

$$P_0 = 5,90 \cdot 10^{-3} \pm 0,05 \cdot 10^{-3} \text{ W}$$

$$\Rightarrow P \approx 29,34 \text{ W/m}^2$$

$$T = \underline{386^\circ\text{C}}$$

18.50

Klar med mätningar. Här ständat det mest.

Sista tar vi imorgon.

Sista reflektion:

→ Vår effektmätare matte mellan 0,19 & 20 μm .

Dessa är förmodligen inte tillräckligt.
Behöver tanka på det.

→ Inte bara en temp innan i ugnen. Se IR-bilder.

→ Lampa bräsig av någon anledning. Såg till labbhandleden.

- GPIB funkar nog nu.
- Ugren blir max 520°C .
- Glaset blir inte så varmt.
- Mikrovägssexempel från förgiven häfte
nog inte funkt. $(0,1 \text{ W/m}^2)$
 bare

18:57 Hägg hem.