

Mars 1988

LABORATION **T8C** FÖR F3

TERMOELEKTRISK VÄRMEPUMP

INNEHÅLL

1. Teori
2. Värmepumpens konstruktion
3. Mätning

Handledare:

Namn:

Laborationen utförd den

Laborationen inlämnad den

Godkänd den

av

AVSIKT.

Avsikten med laborationen är att studera hur termoelektriska effekter kan utnyttjas

- 1) för att skapa en elektrisk värmepump respektive kylmaskin,
- 2) för att producera ström samt
- 3) för att mäta temperatur.

OBS! Kontrolluppgiften i slutet av teorikapitlet skall vara klar innan Du kommer till laborationen.

TEORI.

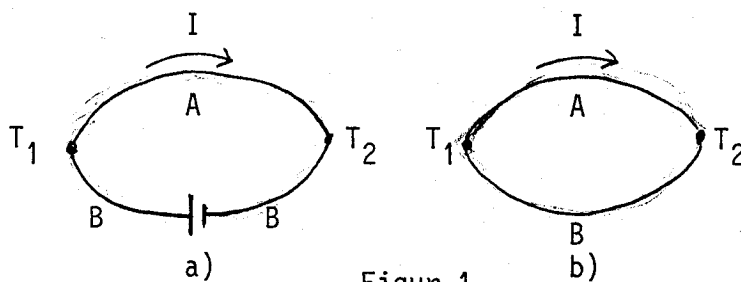
För beskrivningen av en termoelektrisk kylmaskin/värmepump respektive strömgenerator hänvisas till kursboken: G.J. van Wylen and R. E. Sonntag, Fundamentals of classical thermodynamics, tredje upplagan, kapitel 1, avsnitt 1.4.

Nedan ges en kortfattad beskrivning av de fysikaliska processer som ligger till grund för termoelektriska värmepumpar/kylmaskiner, strömgeneratorer och termoelement.

Om en elektrisk ström drives genom en krets, som består av åtminstone två olika material (fig. 1 a), uppstår i en sådan krets en temperaturdifferens $T_1 - T_2$ mellan sammanfogningarna. Om, å andra sidan, materialen A och B bildar en sluten krets (fig. 1 b) och sammanfogningarna hålls vid olika temperatur kommer en elektrisk ström att genereras i kretsen.

Uppkomsten och storleken av temperaturdifferansen respektive strömmen är ett resultat av fem olika fenomen, som uppstår i en sådan krets samtidigt:

- a. Joule effekt
- b. Thomson effekt
- c. Peltier effekt
- d. Värmeledning
- e. Seebeck effekt



För att kunna definiera dessa fenomen skall vi utgå från de allmänna termodynamiska ekvationerna för ström- och värmetransport genom en elektrisk ledare. En alternativ beskrivning kan också ges i termer av fasta tillståndets fysik där materialens Fermi nivå, laddningsbärarnas koncentration och effektiv massa osv beaktas.

Det är viktigt att komma ihåg att den elektriska strömmen och värme-strömmen i en elektrisk ledare är kopplade till varandra. Så t ex ger en temperaturgradient upphov till en elektrisk ström. Elektroner med högre energi i den varmare delen av ledaren diffunderar i riktningen mot den kallare delen. Omvänt ger ett elektriskt fält över ledaren upphov till värmetransport, eftersom elektronerna transporterar energi i riktningen mot område med högre elektrisk potential. För en ledare som påverkas samtidigt av både ett elektriskt fält E och en temperaturgradient ∇T gäller till linjär ordning i E och ∇T :

$$J_e = L_{11} E + L_{12} (-\nabla T)$$

$$J_Q = L_{21} E + L_{22} (-\nabla T)$$

där $J_e = I/S$ är strömtätheten, dvs strömmen, I , per ledarens tvärsnittsarea, S , och $J_Q = q/S$ är motsvarande värme-strömtäthet (effekten, q , per tvärsnittsarea).

Den fysikaliska meningen av koefficienterna L_{mn} är ganska uppenbar. Den elektriska konduktiviteten σ definieras som J_e/E under isotermiska förhållanden, dvs då $\nabla T = 0$. Detta innebär att $L_{11} = \sigma$ och $1/L_{11} = \rho$, där ρ är resistiviteten. Samtidigt leder det till en viss värme-ström, som anges av $L_{21}E$. Om vi istället ser till att inget elektriskt fält uppstår, dvs inga potentialskillnader uppstår längs ledaren, men har en temperaturgradient ∇T , blir värme-strömmen $L_{22}(-\nabla T)$. Värmeledningsförmågan λ (watt/meter Kelvin) definieras emellertid som $J_Q/(-\nabla T)$ under det villkoret att ingen elektrisk ström går genom ledaren dvs $I = 0$. Det leder till den exakta relationen

$$\lambda = L_{22} - \frac{L_{21}L_{12}}{L_{11}}$$

Den sista termen är i regel mycket liten jämfört med L_{22} och följaktligen gäller $\lambda = L_{22}$ med god noggrannhet. Vi noterar också att för en ideal isolator är $L_{11} = L_{12} = L_{21} = 0$ och då gäller exakt $\lambda = L_{22}$, och värmeledningen orsakas i detta fall av gittersvängningarna. I metaller sker emellertid den helt dominerande delen av värmetransporten genom lednings-elektronernas rörelse.

Vi skall systematisera de olika termoelektriska fenomenen med avseende på följande kriterier: värmeutveckling i ledare, värmetransport genom ledare samt uppkomsten av emk i en termokrets.

1. Värmeutveckling i en ledare.

a. Joule-effekt.

Antag att vi har en ledare med samma temperatur överallt, dvs $\nabla T = 0$. Om en elektrisk ström passerar genom denna kommer temperaturen i ledaren att börja stiga. Den värmemängd som produceras i ledaren och som alltså måste bortföras för att återställa ledarens ursprungliga temperatur kallas Joule-värmet. Den utvecklade värmeeffekten per volymenhet är lika med ρJ_e^2 . Joule-processen är oberoende av strömriktningen och är irreversibel. I vissa fall kan Joule-effekten utnyttjas, som t ex vid en direkt uppvärmning av hus, i glödlampor och dyl, men i andra fall leder den till oönskade energiförluster.

b. Thomson-effekt.

Leder vi en konstant ström genom en ledare, i vilken vi samtidigt har en viss temperaturgradient, utvecklas extra värme förutom Joule-värmet. Detta fenomen bär namnet Thomson-effekten och man finner att Thomson-värmet/volympenhet tidsenhet = $\tau(\nabla T \cdot J_e)$, där τ är en materialkonstant och kallas Thomsonkoefficienten. För positivt värde på τ absorberas värme från omgivningen, då temperaturgradienten och elektriska strömmen har samma riktning. Ändras strömriktningen sker istället utveckling av värme, dvs Thomson-effekten är reversibel. Thomson-koefficienten är vanligtvis mycket liten (några mikrovolt per Kelvin) och är dessutom temperaturberoende. Den kan till och med ha olika tecken i skilda temperaturområden.

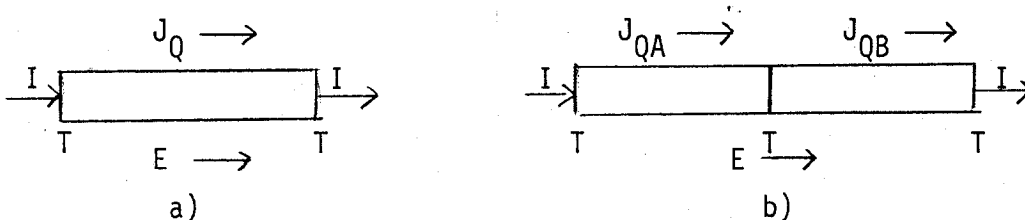
II. Värmetransport längs en ledare.

Låt oss för en stund bortse från värmets utveckling i ledaren (vi antar t ex att denna värmemängd bortföres genom sidväggarna till en yttre reservoar så att Joule- och Thomson-effekterna inte påverkar ledarens temperatur) och istället koncentrera oss på värmets transport längs ledaren. Värmeflöde p g a värmeledning, $J_Q = \lambda(-\nabla T)$, har vi redan beskrivit. Nu skall vi ägna oss åt den del av värmeflödet, som sker via elektrisk ström.

c. Peltier-effekt.

Betrakta en ledare vid konstant temperatur (se fig. 2 a). Strömstätheten och värmeströmstätheten genom ledaren beror då bara på fältstyrkan E enligt $J_e = L_{11}E$ och $J_Q = L_{21}E$. Sambandet mellan J_Q och J_e är då $J_Q = (L_{21}/L_{11})J_e = \pi J_e$ vilket ger $q = \pi I$. Koefficienten π kallas differentiella Peltier-koefficienten och är en materialkonstant. Den anger hur mycket värme per tidsenhet, q , som transporteras av strömmen, I , genom en given ledare. Dimensionen hos π är volt.

Antag nu istället att vi har två olika ledare A och B, som är sammanfogade med varandra (se fig. 2 b) och har koefficienterna π_A respektive π_B ($\pi_A > \pi_B$).



Figur 2.

Elektriska strömmen genom A och B är uppenbarligen densamma. Värmevärdet J_{QA} in mot fogen är då större än strömmen J_{QB} ut från densamma. Skillnaden $J_{QA} - J_{QB} = (\pi_A - \pi_B) J_e$ utgör den värmeeffekt per ytenhet som utvecklas och som skulle leda till en temperaturhöjning i fogen, om värmets inte leds bort till omgivningen. Vänder vi på strömriktningen absorberas samma mängd värme från omgivningen. Detta fenomen kallas Peltier-effekten och den är reversibel (Reversibiliteten hos ström-värme utvecklingen upptäcktes av Lenz och kallas också Lenz-effekten). Värmet som omsätts kallas Peltier-värmet och effekten är

$$q = q_A - q_B = \pi_{AB} \cdot I$$

där materialkonstanten $\pi_{AB} = \pi_A - \pi_B$ kallas Peltier-koefficienten för metallparet (termoelementet) A och B.

III. Uppkomsten av emk i en termokrets.

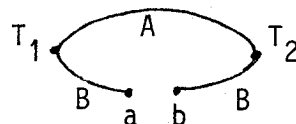
d. Termoelektrisk effekt (Seebeck-effekt).

Av relationen mellan strömmen I och det elektriska fältet och temperaturgradienten följer att $I = 0$, om

$$E = - \frac{L_{12}}{L_{11}} (-\nabla T).$$

Fältet E och temperaturgradienten (∇T) ger då upphov till lika stora men motsatt riktade krafter på elektronerna. Materialkonstanten $\epsilon = (L_{12}/L_{11})$ kallas den differentiella Seebeck-koefficienten. Med två skilda ledare sammanfogade som i figur 3 och där de båda fogarna hålls på skilda temperaturer T_1 och T_2 uppstår en viss potentialskillnad (emk), E , mellan ändarna a och b. Vi får relationen

$$E = \int_a^b E \, dS = \epsilon_{AB}(T_2 - T_1),$$



Figur 3.

där $\epsilon_{AB} = \epsilon_B - \epsilon_A$ (observera definitionen) kallas termoelektriska kraften eller Seebeck koefficienten. Uppsättningen kallas allmänt ett termoelement och används för att mäta temperaturdifferansen $T_2 - T_1$. Själva effekten kallas termoelektriska effekten eller Seebeck-effekten.

E är vanligtvis inte större än några millivolt även för stora temperaturdifferanser $T_2 - T_1$.

Strömgenerator

Kortslutes (a) och (b) i figur 3 bildas en sluten elektrisk krets. Håller vi hela tiden en viss temperaturskillnad mellan de två metallfogarna uppstår en elektromotorisk kraft (den termoelektriska effekten) som i sin tur leder till strömning av elektroner. Vi har fått en strömgenerator. Samtidigt bildas i kretsen både Joule-värme och Thomson-värme, och vi får Peltier-effekt i fogarna. Vi kan notera att Joule-värmet och Thomson-värmet är kvadratiska i ∇T och I , medan Peltier och termoelektriska effekter är lineära.

Sambandet mellan olika termoelektriska effekter.

De skilda termoelektriska koefficienterna π , ϵ , τ är inte oberoende av varandra. Kelvin visade på empirisk väg att

$$\pi_{AB} = T \epsilon_{AB} \quad (\pi = - T\epsilon)$$

(Observera definitionerna $\pi_{AB} = \pi_A - \pi_B$, $\epsilon_{AB} = \epsilon_B - \epsilon_A$) och detta kallas ofta Kelvins andra relation. Den bevisades långt senare rigoröst av Onsager och utgör en av dennes allmänna relationer, som bär hans namn (Onsager erhöll 1968 års Nobelpris för "de efter honom uppkallade reciprocitetsrelationerna, som är grundläggande för den irreversibla termodynamiken"). På samma

sätt existerar följande samband mellan τ och ϵ :

$$\tau = T \frac{d\epsilon}{dT}.$$

Tillsammans med Kelvins andra relation ovan får vi

$$\frac{d\pi_{AB}}{dT} + \tau_A - \tau_B = \epsilon_{AB}.$$

Den kallas Kelvins första relation och den härleddes av Kelvin utgående enbart från energiprincipen. Den bygger således inte på Onsagers bevis. Tvärtom är det så att de två först nämnda relationerna bygger på Onsagers mycket djupare argumentering.

Hemuppgift.

Till sist, för att vara säker på att Du har en klar bild om alla dessa effekter skall Du bevisa att enk:n E i t ex kretsen i fig. 1 b kan uttryckas enligt:

$$E = (\pi_{AB})_{T_1} - (\pi_{AB})_{T_2} + \int_{T_1}^{T_2} (\tau_A - \tau_B) dT$$

om vi bortser från Joule-förluster.

ANVISNING: Sammanställ effektbalansen för kretsen 1 b, där vi vill bibehålla både strömmen och metallfogarnas temperatur konstanta.

EXPERIMENTELL UTRUSTNING.

För givna material och given ström påverkas storleken av den temperaturdifferens som kan erhållas med Peltier-effekt av den Joulska effekten och värmeledningen mellan den kalla och varma övergången.

Lämpliga material bör ha:

1. Hög "konversionskoefficient" dvs producera stor temperaturdifferens för viss ström.
2. Hög elektrisk ledningsförmåga för att minimera Joule-värmet.
3. Låg termisk ledningsförmåga för att minimera värmeledningen mellan den kalla och den varma övergången.

Observera att punkt 2 och 3 är motstridande. Materialet i denna apparats Peltiermodul är en halvledarelegering av vismuttellurid närmare bestämt $\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{Sb}_2\text{Te}_3$ (P-typ) och $\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{Bi}_2\text{Se}_3$ (N-typ). När strömmen passerar från

en halvledare av N-typ mot en metall erhålles absorption av värme (motsatta förhållandet för P-typ). Samma fenomen erhålles vid övergången metall-halvledare av P-typ. Modulen består av små block, ett block av P-typ och ett av N-typ bildande ett par (fig. 4 jämför fig. 10 i kursboken). En Peltier-modul är tillverkad av ett antal sådana par. På grund av konstruktionens möjlighet till sammankoppling kan kalla och varma ytor av relativt stora dimensioner erhållas. Modulen ligger mellan två aluminiumstycken med termometerhål för att öka den mekaniska styrkan. Den varma sidan av modulen är utrustad med kylflänsar och kylfläkt, den kalla har möjlighet till uppvärmning (fig. 5).

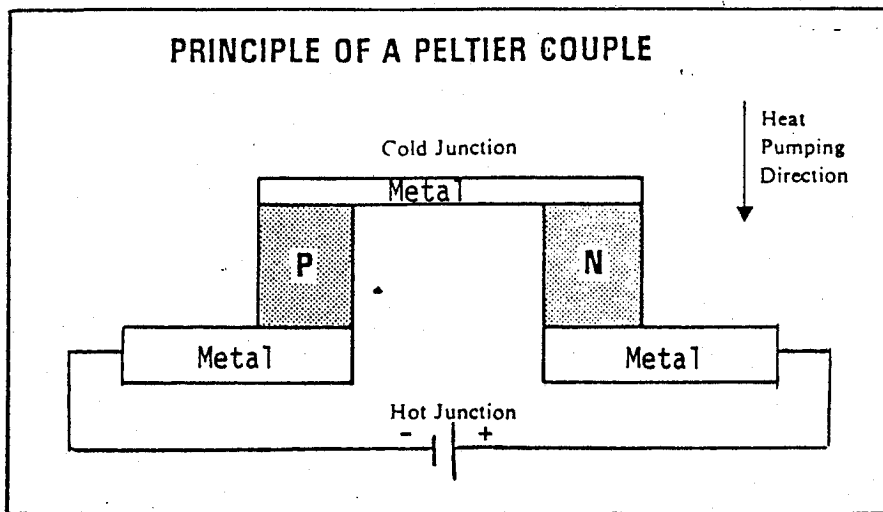


Fig. 4.

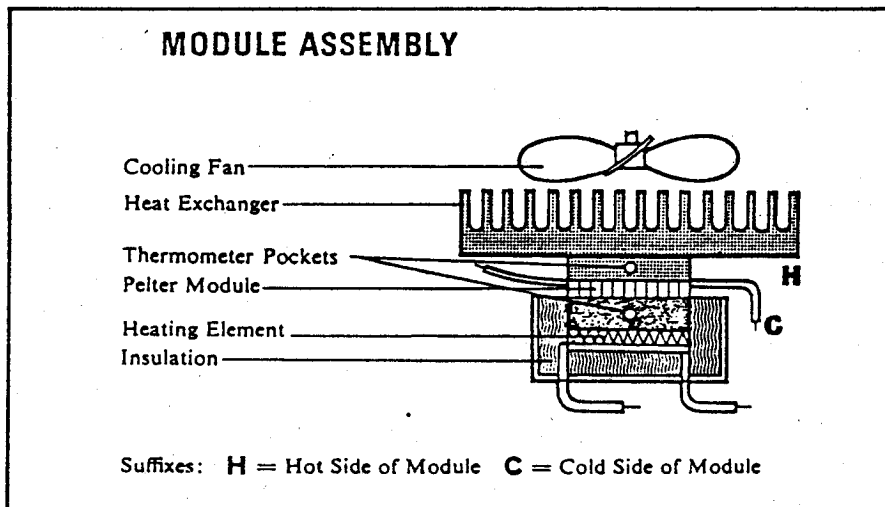


Fig. 5.

Kontrollpanelen visas i fig, 6. Vid insättning av termometrarna i hålen i aluminiumblocken, se till att Du får god termisk kontakt genom att smörja in kontaktytorerna med kiselfett.

Termometertemperaturen får aldrig överskrida 120⁰ C.

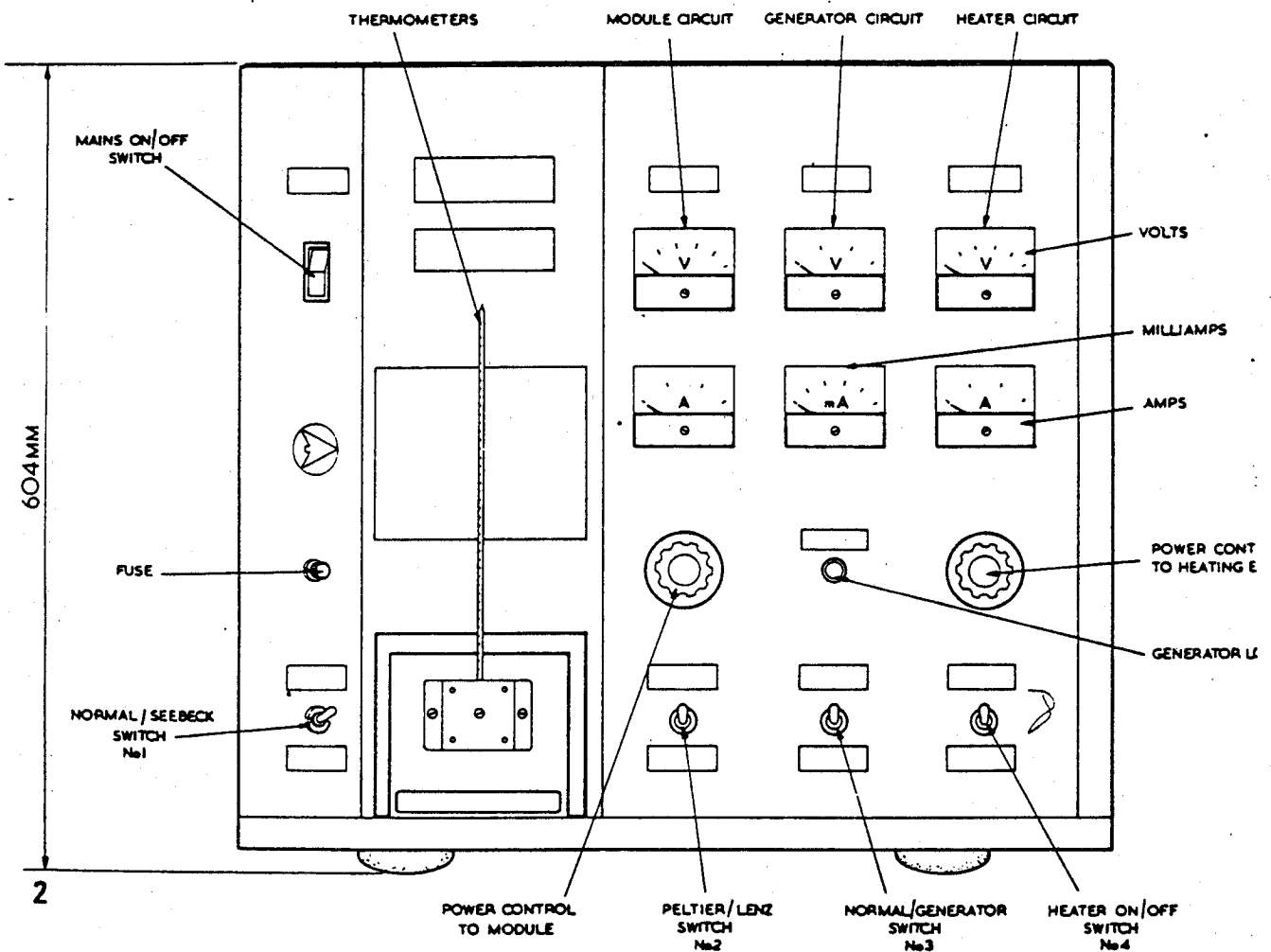


Fig. 6.

UTFÖRANDE

Uppgift 1. Peltier-effekt.

Kontrollera att termometrarna är insatta på plats (termometern -10°C till 110°C skall stå på C-sidan).

När omkopplare 1 till 4 står i positionen "NORMAL", "PELTIER", "NORMAL" respektive "OFF" går strömmen genom modulen i en sådan riktning att värme avges på H-sidan och absorberas på C-sidan. Strömstyrkan inställes med hjälp av "Power control to module"-ratten.

Välj en lämplig ström (t ex 5 amper) och observera termometrarna.

Diagram 1 på sista sidan visar ett typiskt förhållande mellan kylfaktorn, "coefficient of performance", för en termoelektrisk kylmaskin och den tillförda effekten.

Diskutera vad som inverkar på försämringen av kylfaktorn.

Uppgift 2. Lenz-effekt.

Ändra strömriktningen genom modulen genom att slå om omkopplaren nr 2 i "Lenz"-läget. Justera strömmen till ca 2 A, (temperaturen i modulen får aldrig överstiga 110°C) och observera termometrarna.

Diskutera observationerna.

Uppgift 3. Termoelektrisk strömgenerator.

Stäng av strömmen genom modulen genom att vrida ratten "Power control to module" i noll-läge.

Temperaturen på C-sidan, T_C , kan höjas med hjälp av en värmespiral, vilket ger att temperaturdifferansen $T_C - T_H$ över modulen kan skapas externt. Strömmen genom spiralen regleras med hjälp av ratten "Power control to heating element" när omkopplaren nr. 4 står i läget "ON".

Omkopplaren 1 till 4 skall stå i läge "NORMAL", "PELTIER", "GENERATOR" och "ON". Sätt på strömmen genom uppvärmningsspiralen och observera den i termokretsen genererade strömmen (visas av amperometern i generator-kretsen) som funktion av temperaturdifferansen $T_C - T_H$.

Uppgift 4. Seebeck-effekt.

Om voltmeteren kopplas in i termokretsen och temperaturdifferansen $T_C - T_H$ bibehålles kan emk i termokretsen uppmätas.

Sätt omkopplaren 1 till 4 i läget "SEEBECK", "PELTIER", "NORMAL", "ON". Observera emk (voltmeteren i modulkretsen) som funktion av temperaturdifferansen $T_C - T_H$.

Coefficient of Performance as a Refrigerator

TYPICAL RESULTS AMBIENT TEMPERATURE 21°C.

THE CHARACTERISTIC SHOWN WILL BE INFLUENCED BY AMBIENT TEMPERATURE.

