

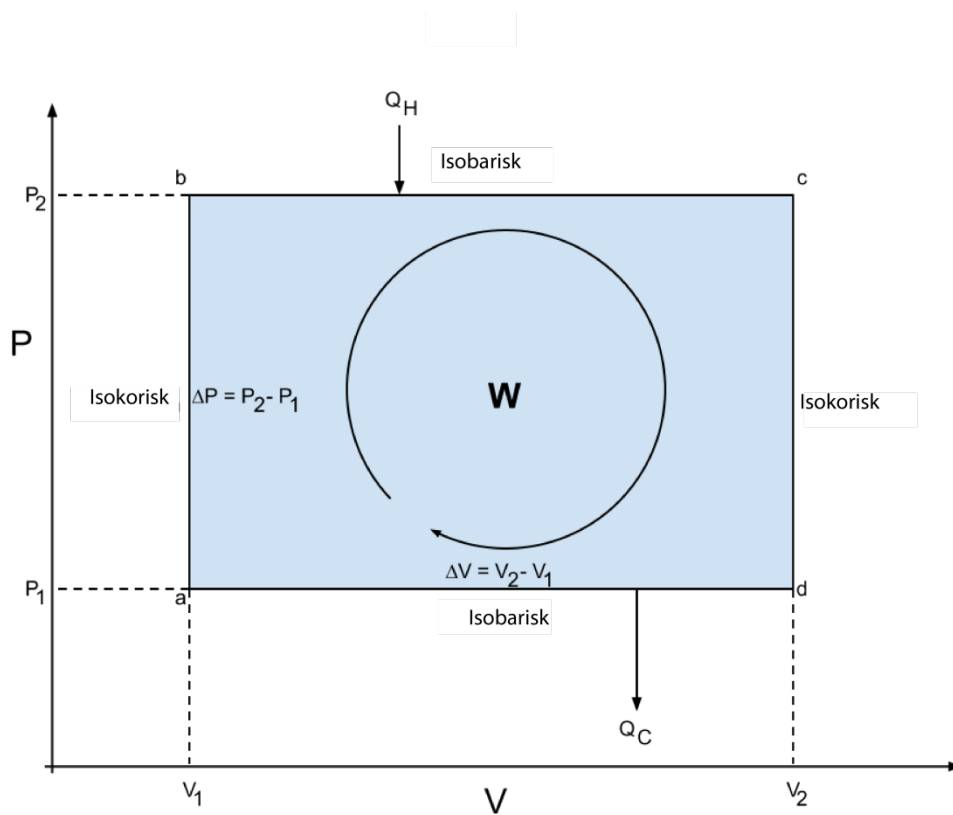
VÄRMEKRAFTMASKIN

1 Inledning

En värmekraftmaskin är en anordning som förvandlar värme till arbete. Detta sker genom att ämnet som värmekraftmaskinen innehåller, t.ex. gasen, mottar och avger värmeenergi och samtidigt utvidgas eller komprimeras. Ibland byter ämnet även aggregationstillstånd under processen. I en fungerande värmekraftmaskin bildar denna serie av termodynamiska processer en sluten cykel i pV -planet.

Det termodynamiska arbetet, som gasen gör under cykeln $abcd$, kan beräknas som arean eller integralen över cykeln i pV -planet

$$W_T = \int_{abcd} P dV. \quad (1)$$



Figur 1. Exempel på en termodynamisk cykel.

Ibland kan cyklerna vara svåra att integrera, deras area kan då bestämmas grafiskt. Figur 1 illustrerar ett exempel på en enkel termodynamisk cykel. För detta exempel bestäms det termodynamiska arbetet på följande vis:

Arbetet för övergången $a \rightarrow b$ är noll eftersom volymen hålls konstant och

$$W_{ab} = 0. \quad (2)$$

Vid övergången $b \rightarrow c$ ökar systemets volym och arbetet som utförs

$$W_{bc} = \int_{V_1}^{V_2} p dV = p_2 V_2 - p_2 V_1. \quad (3)$$

För övergången $c \rightarrow d$ gäller igen

$$W_{cd} = 0. \quad (4)$$

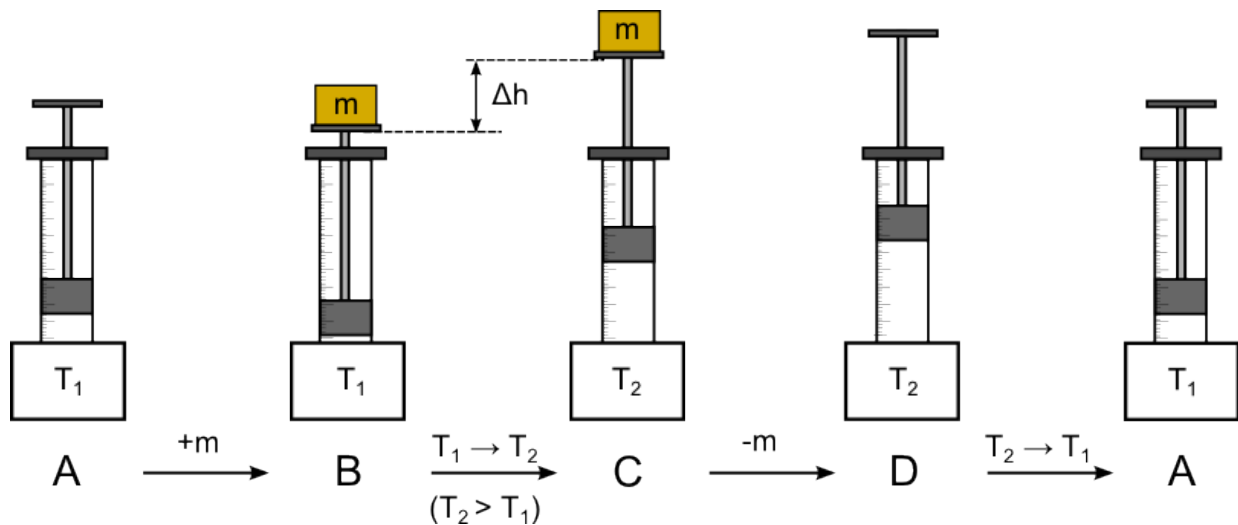
Vid övergången $d \rightarrow a$ minskar systemets volym varvid det utförda arbetet

$$W_{da} = \int_{V_2}^{V_1} p dV = p_1 V_1 - p_1 V_2. \quad (5)$$

Arbetet som utförts under cykeln fås genom att summera arbetet vid varje övergång

$$\begin{aligned} W &= W_{ab} + W_{bc} + W_{cd} + W_{da} \\ &= p_2 V_2 - p_2 V_1 + p_1 V_1 - p_1 V_2 \\ &= (p_2 - p_1)(V_2 - V_1) = \Delta p \cdot \Delta V. \end{aligned} \quad (6)$$

Principen för värmekraftmaskinen som används i detta arbete visas i figur 2. Funktionen baserar sig på ett kolvsystem som är fyllt med luft, vars temperatur ändras. Med ifrågavarande värmekraftmaskin kan man lyfta olika vikter.



Figur 2. Funktionsstegen för värmekraftmaskinen som används i arbetet.

I utgångsläget A är temperaturen för luften i värmekraftmaskinen T_1 . En vikt (massa m) sätts i kolvens vikthållare, varefter temperaturen för luften i värmekraftmaskinen höjs till T_2 . Vikten höjs då en sträcka Δh . Vikten avlägsnas och temperaturen sänks till T_1 , systemet återgår då till sitt utgångsläge. Denna sekvens av processer bildar en sluten cykel i pV -diagrammet (fastän inte en likadan som i figur 1). Om kolvsystemet är friktionsfritt, motsvarar arbetet som gasen gör under cykeln det arbete som görs då vikten lyfts. Detta mekaniska arbete är

$$W_m = mg\Delta h. \quad (7)$$

1.1 Verkningsgraden för Carnotcykeln

Enligt Carnots teorem kan inte en enda värmekraftmaskin som verkar mellan två värmereservoarer vara mera effektiv än en Carnotmaskin som verkar mellan motsvarande reservoarer. Verkningsgraden är

$$e = \frac{W}{Q_H}, \quad (8)$$

där W är arbetet utförts under cykeln, Q_H är energin som sätts in i systemet. Verkningsgraden för Carnotcykeln blir

$$e = 1 - \frac{T_L}{T_H}, \quad (9)$$

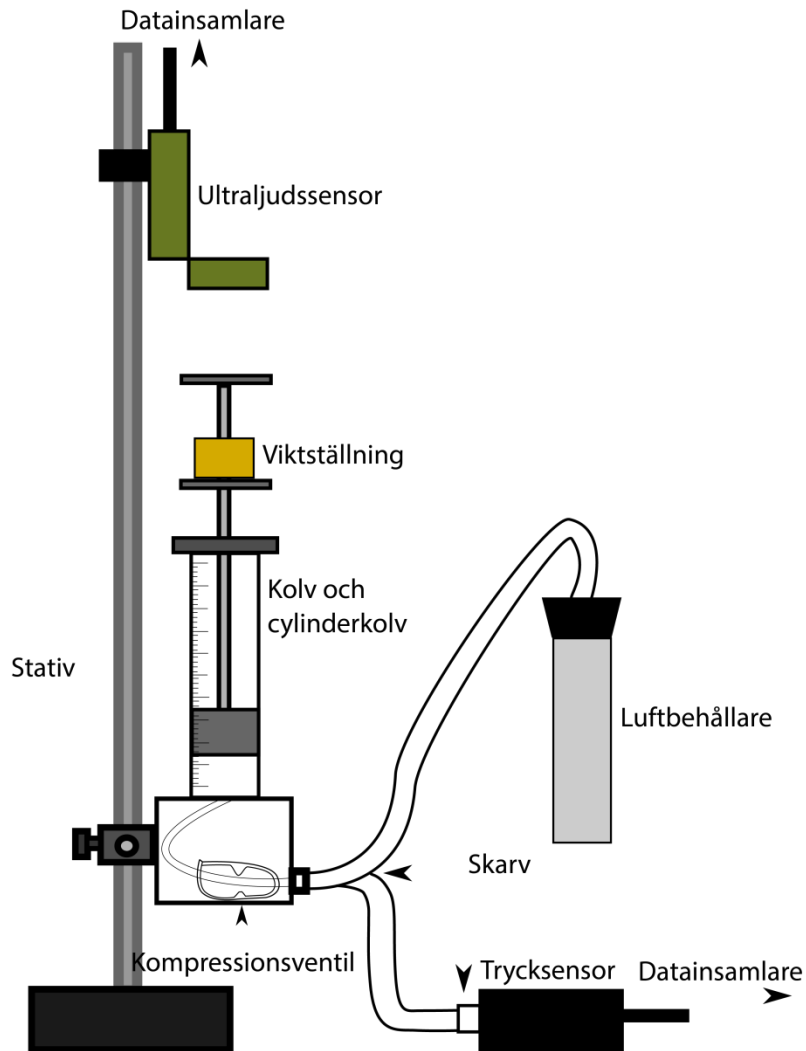
där T_L är temperaturen på den kallare reservoaren och T_H temperaturen på den varmare reservoaren. I arbetet jämförs Carnotcykelns verkningsgrad med den verkliga verkningsgraden.

2 Målsättningar

Efter att ha utfört laboratoriearbetet

- förstår studeranden värmekraftmaskinens funktionsprincip
- kan studeranden känna igen olika termodynamiska processer
- kan studeranden framställa mätresultaten grafiskt och anpassa en rak linje till mätdata

3 Apparatur



Figur 3. Apparaturen som används i arbetet.

Dessutom behövs:

- 2 st vattenbehållare som rymmer 1 l
- viktset (10 g, 2 x 20 g, 50 g och 100 g)
- 2 st termometrar
- skjutmått

I arbetet används en värmekraftsmaskin (figur 2) som lyfter massor på 50–150 g med hjälp av temperaturskillnaden. För att åstadkomma temperaturskillnaden i arbetet används två vattenbehållare, en med rumstempererat vatten och en med hett vatten. I det inledande skedet av arbetet skall de två

kompressionsventilerna under kolvcyklern vara öppna. Vattenbehållarna bör placeras så att luftbehållaren snabbt kan flyttas mellan behållarna. Systemets tryck mäts med en trycksensor som är ansluten till en datainsamlare som i sin tur skickar mätdata till datorn. Höjden på kolven (diameter 32,5 mm \pm 0,1 mm) mäts med en ultraljudssensor som skickar ultraljudspulser med täta mellanrum som reflekteras tillbaka av tyngdställningens översta del. Mottagaren i sensorn observerar de reflekterade pulserna och avståndet från sensorn till tyngdställningen fås av pulsernas propageringstid. Ultraljudssensorn kopplas likt trycksensorn till datorn via datainsamlaren.

4 Förhandsuppgifter

Bekanta dig med teorin som hör till arbetet i valfri fysiklärobok t.ex. [1–3], läs igenom arbetsinstruktionen och besvara frågorna nedan på svarsblanketten.

1. Vilka olika termodynamiska processer finns? Redogör kort.
2. Vad är verkningsgraden för en Carnotmaskin då temperaturen på den kalla behållaren är 25 °C och på den varma 55 °C?
3. I detta arbete bestäms arbetet som gjorts då vikten lyfts med hjälp av ekvation (7). Bestäm felet för detta arbete med hjälp av totaldifferentialen. Av variablerna bör du beakta förändringen i höjd Δh och massan m . (Tips: I det här fallet är det lättare att beräkna det relativa felet)

5 Mätningar

Alla mätresultat och svaren på förhandsuppgifterna antecknas på svarsblanketten. Användning av blyertspenna rekommenderas. Svarsblanketten returneras slutligen åt assistenten.

5.1 Förberedelser för apparaturen

1. Använd vågen till att väga vikterna som används i arbetet.
2. Gör en grov uppskattning av luftbehållarens volym och anteckna den på svarsblanketten.
3. Fyll den ena vattenbehållarna med rumstempererat vatten och den andra med så hett vatten som kommer ur kranen. Kontrollera att luftbehållaren är tätt sluten och placera den i det rumstempererade vattnet. Koppla luftbehållaren och trycksensorn till kolv-cylindersystemets skarvar. Kompressionsventilen bör vara öppen.
4. Placera ultraljudssensorn på ett avstånd av åtminstone 15 cm från viktställningen som lyfts i ytterläge, anslut sensorn till datainsamlaren. Försäkra dig om att ultraljudssensorn är riktad mot viktställningen.
5. Försäkra dig om att viktställningen inte svajar. Den är festsatt med gängor i stängen. Om den svajar kan du försiktigt spänna den.
6. Öppna LoggerPro:s mätunderlag "Lampovoimakone.cmb1" i arbetsbordets Mittauspohjat-folder.
7. Placera kolven i det nedersta läget och välj i "Experiment"-menyn "Set Up Sensors" → "Show All Interfaces". Klicka på ultraljudssensorn och försäkra dig om att "Reverse direction" är vald som riktning på mätningen. Nollställ läget genom att trycka på "Zero" då kolven är i det nedersta läget.

5.2 Mätning

1. **Gör en hypotes och skriv ner den på svarsblanketten:** Vilken typ av process i pV -planet motsvarar cykeln i värmekraftmaskinen som används i arbetet? Skissera pV -diagrammet för stegen i figur 2 och märk i diagrammet punkterna A, B, C ja D. Vad sker om cykeln upprepas utan att vikter tillsätts? Motivera ditt svar fysikaliskt.

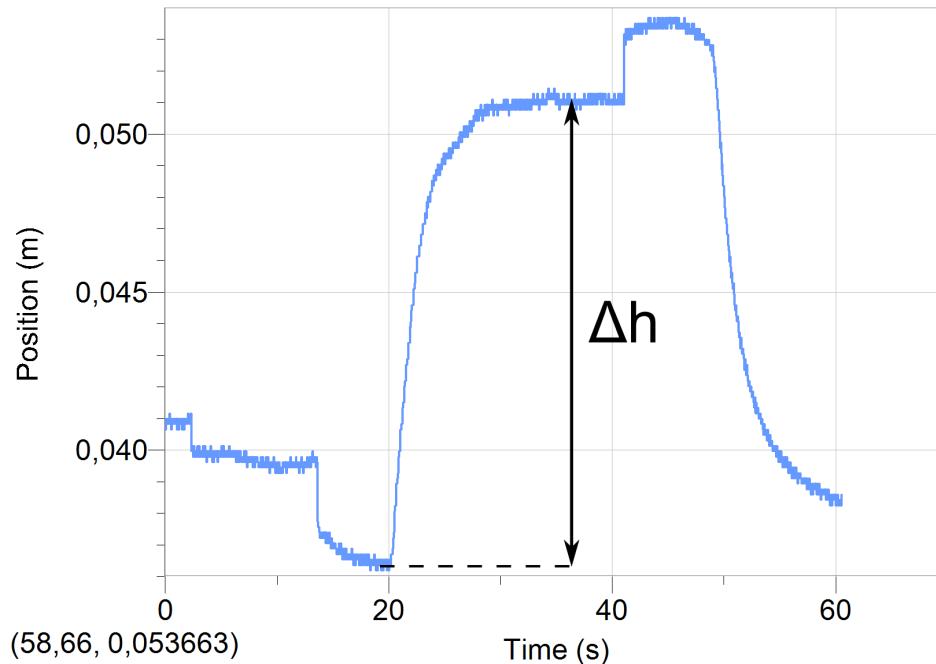
Mätningarna bör utföras i rask takt eftersom apparaturen läcker luft under mätningarna. Upprepa punkterna 3-6 några gånger tills du är säker på att du kan utföra mätningarna i tillräckligt snabb takt och börja först efter det med de egentliga mätningarna. Beakta i feluppskattningen att kolven sjunker något under mätningen.

2. **Testa din hypotes:** Gör en cykel i enlighet med figur 2 enligt instruktionerna nedan (punkterna 3-6) med en tyngd och utan tyngd. Skriv ner dina observationer på svarsblanketten och skissera dina uppmätta pV -beroenden. Om din hypotes inte stämde, fundera varför.
3. Placera luftbehållaren i rumstempererat vatten. Eftersom det är meningen att förflytta behållaren snabbt under mätningarna, är det lättast att hålla behållaren på plats i vattnet genom att hålla i den med handen i dess övre del.
4. Placera kolven i mitten av skalan och spänn fast den med spännskruven. Jämna ut trycket genom att öppna någon av systemets skarvar.
5. Skriv upp temperaturen på vattnet i behållarna i början av varje mätning. Sänk inte ner termometern mera än 4 cm i vattnet (termometerns övre del är inte vattentät). Temperaturförändringar mellan mätningarna behöver man inte bekymra sig om.
6. Mätningarna utförs enligt följande punkter
 - a. Öppna spännskruven.
 - b. Starta mätningen genom att trycka på "Collect" (luftbehållaren är i det rumstempererade vattnet).
 - c. Placera vikterna (50–150 g) försiktigt på viktställningen. Håll handen borta från mellanrummet mellan ultraljudssensorn och viktställningens övre del. Kom även ihåg att kolven läcker något, kolven slutar därför nödvändigtvis inte att sjunka. (Vid behov kan du spänna skruven då vikter läggs på för att förhindra svängningar orsakade av viktpåläggningen. Kom dock ihåg att vara snabb även då du gör detta.)
 - d. Placera luftbehållaren i det heta vattnet och vänta tills kolven slutat stiga. Bästa resultatet får du om du flyttar behållaren direkt efter att vikterna är på plats.
 - e. Ta bort vikten. (Vid behov kan du spänna skruven då vikten tas bort. Kom dock ihåg att vara snabb.)
 - f. Placera luftbehållaren i det rumstempererade vattnet och vänta tills kolvens sjunkande avtagit.
 - g. Avsluta mätningen genom att trycka på "Stop".
7. Genomför de egentliga mätningarna genom att använda tre olika kombinationer av vikter (50–150 g). Spara varje lyckad mätning (se Logger Pro – instruktionen).

8. Spara slutligen mätresultaten för senare undersökningar (det lönar sig att spara mätningarna både i textformat och som en Logger Pro-fil). För sparandet kan du använda antingen den lokala Mittausdata-foldern eller Opiskelijat-nätskivan.
9. Häll ut vattnet och städa upp efter dig.

6 Behandling av resultaten

Arbetet som gasen gör bestäms från pV -diagrammets area. Anta att arean som begränsas av pV -diagrammet är t.ex. ett rektangel eller ett parallelogram för att underlätta bestämningen av arean. Då kan du beräkna arean direkt från förändringen av trycket och volymen Δp och ΔV . Bestäm också det mekaniska arbetet genom att bestämma förändringen i potentialenergi för tyngden då den stiger sträckan Δh (figur 4). Bestäm felmarginaler för förändringarna i trycket, volymen och höjden från onoggrannheten i mätningarna.



Figur 4. Bestämmandet av höjdförändringen för beräkning av det mekaniska arbetet.

1. Bestäm arean som begränsas av pV -diagrammet i varje mätning, dvs. arbetet W_T som gasen gör jämte dess fel med hjälp av förändringarna i trycket och volymen.
2. Bestäm för varje mätning arbetet som görs för att lyfta tyngden W_m jämte dess fel med hjälp av sträckan Δh som tyngden stiger.
3. Skriv ut ett pV -diagram och märk i diagrammet hur arean som begränsas av cykeln har bestämts. Bifoga grafen till din svarsblankett.

4. Uppskatta luftens volym i apparaturen (du behöver inte beakta slangens volym) och räkna ut m.h.a. luftens densitet och värmekapacitet hur mycket energi som krävs för att värma upp luften då behållaren flyttas från det kallare till det varmare vattnet. Använd i beräkningen någon av de uppmätta temperaturskillnaderna.
5. Beräkna värmekraftmaskinens verkningsgrad genom att använda det mekaniska arbetet för den mätning som användes vid föregående punkt samt värmemängden som beräknas ovan.
6. Beräkna Carnotcykelns verkningsgrad för samma mätning.

7 Tankeställare

1. Motsvarade arbetet som gasen gjorde det arbete som krävdes för att lyfta tyngden? Ifall ej, fundera varför.
2. Jämför den beräknade verkningsgraden med verkningsgraden för Carnotcykeln. Vad märker du och vad tror du det beror på?
3. Hur mycket arbete gör värmekraftmaskinen, om processen i figur 2 upprepas utan vikter, d.v.s. endast kolven rörs sig fram och tillbaka?

Källor

- [1] D.C. Giancoli, Physics for Scientists & Engineers with Modern Physics 4th edition, International edition, Pearson Education, Inc, 2009.
- [2] Hugh Young, Roger Freedman, A. Lewis Ford: University Physics with Modern Physics. International Edition. 13. upplagan. Pearson Education, 2011.
- [3] Halliday, Resnick, Walker, Fundamentals of Physics Extended, Extended 9th edition, International Student Version, Wiley & Sons, Inc., 2011.