

PM utarbetat av Johan Åman, Jonas Enger, Ernest Karawacki, Alf Sjölander och Göran Wahnström. Delvis omarbetat av Göran Niklasson.

T4

Varmluftsmotorn

Målsättning:

- * Att förstå termodynamiska kretslopp, speciellt Stirling-cykeln som varmluftsmaskinen bygger på.
- * Att förstå hur varmluftsmaskinen kan användas som motor, värmepump eller kylmaskin, beroende på om värme eller arbete tillförs.
- * Att kunna bestämma verkningsgraden, både teoretiskt och praktiskt.

Förberedelser:

Lab-PM skall vara noga genomläst.

Inlämningsuppgifterna skall vara utförda, och lämnas in till assistenten vid laborationens början. Utan ifyllt uppgiftsblad kommer elever ej att tillåtas påbörja laborationen. Uppgifterna rättas under laborationens gång av assistenten. Godkända inlämningsuppgifter krävs för godkänd laboration.

Namn: _____ Linje _____ Datum _____

Godkänd inlämningsuppgifter den _____ av _____

Godkänd laborationsuppgifter den _____ av _____

Godkänd *hela* laborationen den _____ av _____

Förkunskaper

Kännedom om:

- Termodynamikens huvudsatser,
- Termodynamiska processer (t.ex. isobar expansion),
- Termodynamiska kretslopp (t.ex. Carnot-processen),
- Termodynamiska diagram (t.ex. TS-diagram),
- Gasers beteende (t.ex. förutsättningar för idealgasapproximationen),
- Egenskaper för ideala gaser (t.ex. att inre energin endast beror på temperaturen),
- Hur arbete och värme bestäms grafiskt ur diagram.

För utförlig behandling av teorin och för att erhålla nödvändiga förkunskaper, hänvisas till tillgängliga läroböcker, t ex "Fundamentals of Statistical and Thermal Physics" av F. Reif, "Statistical Physics" av E. Mandl, eller "Fundamentals of Classical Thermodynamics" av G J van Wylen och R E Sonntag.

Innehåll

- 1 Teori
 - 1.1 Beteckningar
 - 1.2 Termodynamiska begrepp
 - 1.3 Ideala gaser
 - 1.4 Stirling-cykeln
- 2 Utrustning
- 3 Uppgifter
 - 3.1 Studium av Stirling-cykeln
 - 3.2 Kylmaskin / värmepump
 - 3.3 Cykel i pV-diagram
 - 3.4 Motor
 - 3.4.1 Effektivitet från bromsprov
 - 3.4.2 Effektivitet ur pV-diagram
- 4 Inlämningsuppgifter

1 Teori

1.1 Beteckningar

Beteckningarna följer van Wylen/Sonntag: "Fundamentals of Classical Thermodynamics".

Betydelse	Beteckning	Enhet
Värme	Q	J
Arbete	W	J
Inre energi	U	J
Absolut temperatur	T	K
Entropi	S	J/K
Entalpi	H	J
Absolut tryck	p	Pa
Volym	V	m ³
Effektivitet / Verkningsgrad	η	
Kylfaktor / Värmefaktor	β	
Molmängd	n	mol
Allmänna gaskonstanten	R	J/mol K
Vinkelfrekvens	ω	rad/s
Vridmoment	M	Nm
Effekt	P	W

1.2 Termodynamiska begrepp

Den klassiska termodynamiken är baserad på ett antal fundamentala lagar, de så kallade huvudsatserna. I den här laborationen används första och andra huvudsatsen.

Första huvudsatsen är i grund och botten inget annat än lagen om energikonservering, som säger att den inre energin för ett slutet system är konstant ($dU = 0$).

Andra huvudsatsen säger att riktningen hos fysikaliska processer i ett slutet system måste vara sådan att entropin alltid ökar eller möjligen förblir konstant ($dS \geq 0$).

För öppna system, där värme (∂Q) tillförs systemet och arbete (∂W) utträttas av systemet, kan huvudsatserna formuleras så här:

$$\text{Första huvudsatsen: } dU = \partial Q - \partial W \quad (1)$$

$$\text{Andra huvudsatsen: } dS \geq \partial Q / T \quad (2)$$

Likhetstecknet i (2) gäller vid reversibla processer. Begreppet "reversibel process" förklaras närmare i kursboken. Enkelt uttryckt betyder det en process som sker utan friktionsförluster, så att det i princip är möjligt att återgå till begynnelsetillståndet utan att universums entropi har ökat.

Termodynamiska tillstånd för en fix mängd av en enkel enkomponentig vätska eller gas kan fullständigt beskrivas med två oberoende tillståndsvariabler, t ex temperatur och volym. Detta gör det lämpligt att presentera data i diagram. Ofta visas en intensiv (mängdberoende) variabel som funktion av en extensiv (mängdberoende) variabel, t.ex. pV- eller TS-diagram.

I dessa diagram kan man sedan markera konturer för vilka någon annan variabel är konstant. Några vanliga konturer är isotermer (T konstant), isobarer (p konstant), isokorer (V konstant), isentroper (S konstant) och isentalper (H konstant).

Man kan med hjälp av de ovan nämnda konturerna definiera vissa standardprocesser som sker i termodynamiska system, t ex isokor avkylning eller reversibel adiabatisk (=isentropisk) expansion.

Ett termodynamiskt system som genomgår ett slutet kretslopp sägs genomgå en cykel. Sådana cykliska processer används i praktiska tillämpningar för att producera arbete utgående från tillfört värme (värmemotorer), eller omvänt för att med hjälp av tillfört arbete pumpa värme från kallare till varmare system (kylmaskiner, värmepumpar). Man eftersträvar naturligtvis att finna så effektiva processer som möjligt. Som utgångspunkt för teoretiska studier använder man ideala reversibla cykler, som definieras med hjälp av olika idealiserade delprocesser. Den teoretiskt sett mest effektiva är Carnot-cykeln, som är sammansatt av två isotermer och två adiabater. Det finns andra ideala cykler, vilka har samma eller lägre effektivitet under motsvarande arbetsförhållanden. Till den senare kategorin hör t.ex. Otto-cykeln, som approximativt beskriver processen i en bensinmotor.

För ett system som endast utför expansionsarbete eller tillförs kompressionsarbete (d.v.s. allt arbete sker genom volymändringar) kan uttrycket för arbete förenklas:

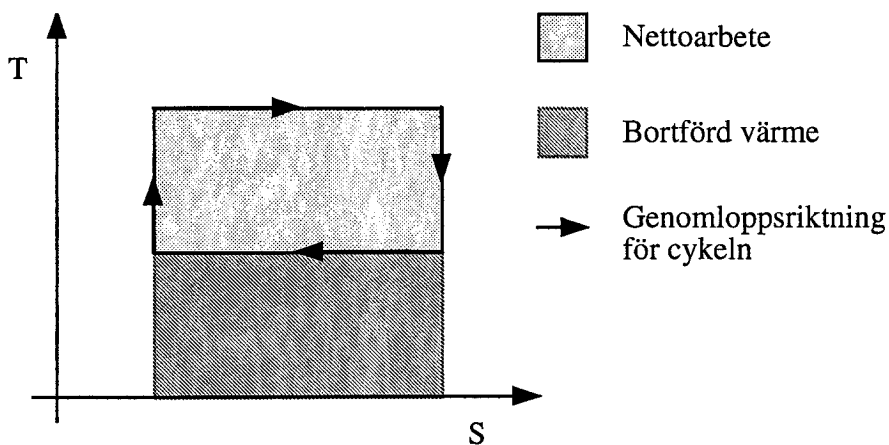
$$\partial W = p dV \quad (3)$$

Av (2) framgår att man kan beräkna tillfört eller bortfört värme ur TS-diagram som areor (integraler) under processkurvor. På samma sätt medför (3) att man kan beräkna arbete som areor under kurvor i pV-diagram.

För en hel sluten cykel är ändringen av den inre energin noll, eftersom man efter ett helt varv har kommit tillbaka till samma tillstånd. Den första huvudsatsen (1) ger då att nettoarbetet är lika med skillnaden mellan tillfört och bortfört värme.

$$\text{För en cykel: } W_{\text{netto}} = Q_{\text{tillfört}} - Q_{\text{bortfört}} \quad (4)$$

Cykeln i figur 1 har ett positivt nettoarbete, d.v.s. man får ut arbete från cykeln. Den kan då användas som motor, om värme tillförs t.ex. från en glödtråd och bortförs vid en lägre temperatur, t.ex. till kylvatten.



Figur 1: **Carnot-cykel**. Arealen under den övre isoterme representerar tillförd värme. Det nettoarbete man kan få ut är skillnaden mellan tillförd och bortförd värme.

Om cykeln reverseras (genomloppsriktningen ändras) så blir nettoarbetet negativt, d.v.s. man måste tillföra arbete. Arealen under den övre isoterme i figur 1 representerar då bortförd värme. Den reverserade cykeln kan användas som kylmaskin (om man är intresserad av det tillförda värmnet) eller värmepump (bortförd värme intressant). I princip är det ingen skillnad mellan en kylmaskin och en värmepump. En kylmaskin kan även användas som en värmepump, vilket man lätt inser om man känner efter hur varmt det blir på baksidan av ett kylskåp. Kylskåpet värmer rummet, d.v.s. det är en värmepump.

Effektivitet för cykler definieras som

$$\eta_{\text{motor}} = W_{\text{netto}} / Q_{\text{tillfört}} \quad (5)$$

$$\beta_{\text{kylmaskin}} = Q_{\text{tillfört}} / W_{\text{tillfört}} \quad (6)$$

$$\beta_{\text{värmepump}} = Q_{\text{bortfört}} / W_{\text{tillfört}} \quad (7)$$

Vanligen använder man ordet "verkningsgrad" när man talar om effektiviteten η för en motor och "kylfaktor" respektive "värmefaktor" när man talar om effektiviteten β för en kylmaskin respektive en värmepump.

För en Carnot-cykel härleder man lätt ur första och andra huvudsatsen att

$$\eta_{\text{motor}} = W_{\text{netto}} / Q_{\text{tillfört}} = 1 - T_L / T_H \quad (8)$$

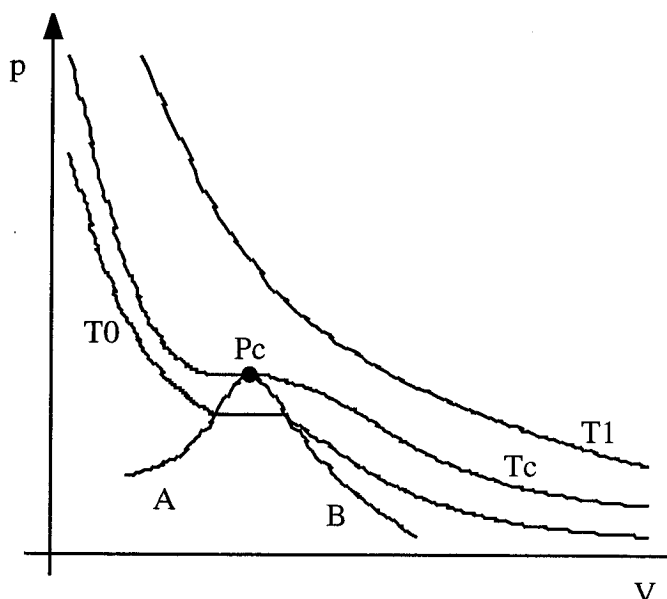
där T_H är den högsta temperaturen under processen (värmekällans temperatur) och T_L är den lägsta temperaturen under processen (kylarens temperatur). Denna verkningsgrad är den högsta möjliga för en värmemotor som arbetar mellan givna temperaturgränser. Det framgår av (8) att verkningsgraden alltid är mindre än ett, vilket är ett fundamentalt faktum som inte har något att göra med eventuella förluster genom friktion eller liknande. Verkliga cykler, t. ex. i bensinmotorer, har givetvis ännu lägre verkningsgrad, dels på grund av att de flesta använder cykler med lägre verkningsgrad än Carnot-cykeln, som t. ex. Otto-cykeln, dels på grund av friktionsförluster m.m.

1.2 Ideala gaser

Som vi tidigare har nämnt är termodynamiska tillstånd för vätskor och gaser entydigt bestämda av två tillståndsvariabler, men sambanden mellan de olika variablerna är oftast komplicerade. Det finns dock vissa specialfall, då dessa samband kan approximeras med enkla analytiska uttryck, s k tillståndsekvationer. Det mest kända är den ideala gaslagen, vilken är approximativt giltig för gaser under vissa förutsättningar.

$$\text{Ideala gaslagen: } p V = n R T \quad (9)$$

Dessa förutsättningar kan studeras med hjälp av isotermer i pV-diagram (se figur 2). Av ideala gaslagen (9) framgår att pV-kurvorna är hyperbler för konstant T (isotermer).



Figur 2: pV-diagram för en gas med isotermer. $T_1 > T_c > T_0$. P_c är den kritiska punkten. A och B är kurvorna för mättad vätska resp mättad ånga. Den kritiska isotermen (T_c) har en sadelpunkt (inflexionspunkt) vid det kritiska trycket.

Figur 2 ovan visar att isotermera närmar sig hyperbler när tillståndet för gasen är långt ifrån den kritiska punkten. Luft kan i många sammanhang approximeras med kvävgas (N_2), för vilken den kritiska temperaturen är 126.3 K och det kritiska trycket är 3.4 MPa. Vid rumstemperatur (300 K) kan man därför använda ideala gaslagen för luft.

I de flesta fall kan man ur ett pV-diagram endast beräkna arbete men inte värme, eftersom det inte framgår vad som skett med den inre energin. Det finns dock ett viktigt specialfall där även värme kan beräknas ur pV-diagram, nämligen när det handlar om en idel gas. Detta följer av att den inre energin för en ideal gas endast beror av temperaturen.

$$\text{Ideal gas: } U = f(T) \quad (10)$$

För en ideal gas gäller därför, enligt (1), att utfört arbete under en isoterm är lika med tillfört värme.

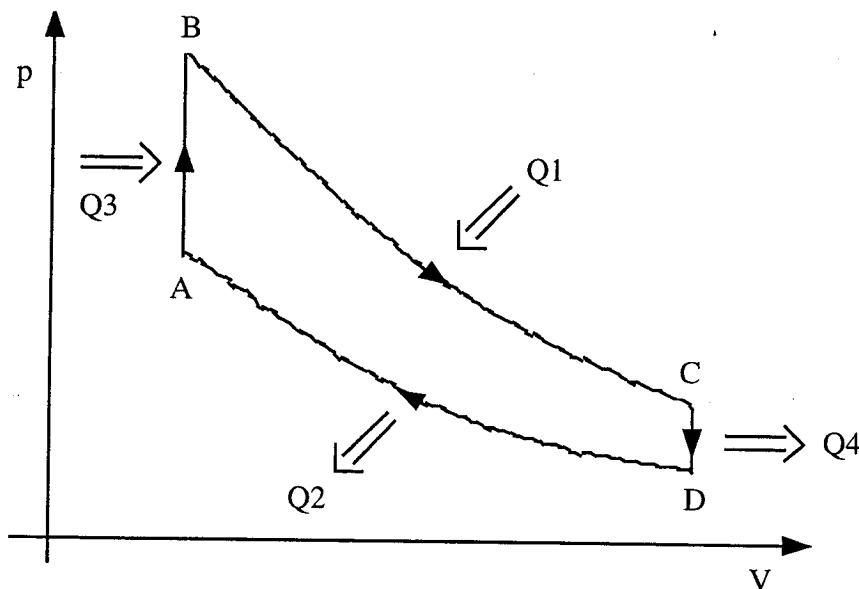
$$\text{Ideal gas, } T \text{ konstant} \Rightarrow U \text{ konstant} \Rightarrow \partial W = \partial Q \quad (11)$$

Detta är dock inte fallet för t ex isobarer, och givetvis inte heller för icke-ideala gaser.

1.3 Stirling-cykeln

En av de många cykler som används för att modellera kretslopp, är Stirling-cykeln. Motorer baserade på denna cykel har på senare tid fått ett allt större användningsområde, bl. a. i ubåtar.

Stirling-cykeln bygger på en isokor upphettning, en isotermisk expansion, en isokor avkylning och en isotermisk kompression. Dessa kombineras till ett kretslopp, vilket sker i en sluten cylinder, oftast med luft som arbetsmedium.



Figur 3: **Stirling-cykel.** Kretsloppet genomlöps i pilarnas riktning. Isokor upphettning A-B då Q_3 tillförs. Isoterm expansion (vid T_H) då Q_1 tillförs. Isokor avkylning då Q_4 bortförs. Isoterm kompression (vid $T_L < T_H$) då Q_2 bortförs. Hela eller en del av Q_3 kan komma från Q_4 via en regenerator. Om cykeln reverseras (ändrar genomloppsriktning) så ändrar värmeflödena riktning.

Om en gas får expandera adiabatiskt (d.v.s. utan värmeförsel) så sjunker dess temperatur. Om man vill hålla temperaturen konstant, d.v.s. genomföra en isotermisk expansion, krävs att värme tillförs (Q_1 i figur 3). På motsvarande sätt måste värme bortförs under en isotermisk kompression (Q_2). Under den isokora avkylningen, då temperaturen sänks, måste värme bortförs (Q_4), men detta kan till viss del återanvändas, t.ex. via en regenerator, under den isokora upphettningen, då värme måste tillförs (Q_3).

Om Stirling-cykeln genomlöps medurs (se figur 3) så är integralen under den övre isotermer positiv, medan integralen under den nedre isotermer är negativ. Nettoarbetet fås sedan som summan av integralerna, vilket i figur 3 är positivt, d.v.s. cykeln utför ett arbete som kan användas t ex för att driva en propeller. Maskinen fungerar alltså som motor under förutsättning att värme (Q_1) tillförs, t ex från en glödtråd. Om cykeln reverseras blir nettoarbetet negativt, d.v.s. arbete måste tillföras utifrån. Maskinen fungerar då som kylmaskin (Q_2 intressant) eller värmepump (Q_1 intressant).

Observera att med en cykel avses ett kretslopp i ett diagram. Att en cykel reverseras medför inte automatiskt att t.ex. en rotationsriktning för en specifik maskin ändras.

Det är möjligt att öka effektiviteten genom att använda regenerators. En regenerator lagrar den värme som avges under den isokora avkylningen, och tillför den sedan vid den isokora upphetningen. Denna möjlighet att använda regenerators för att höja effektiviteten är en av fördelarna med Stirling-cykeln.

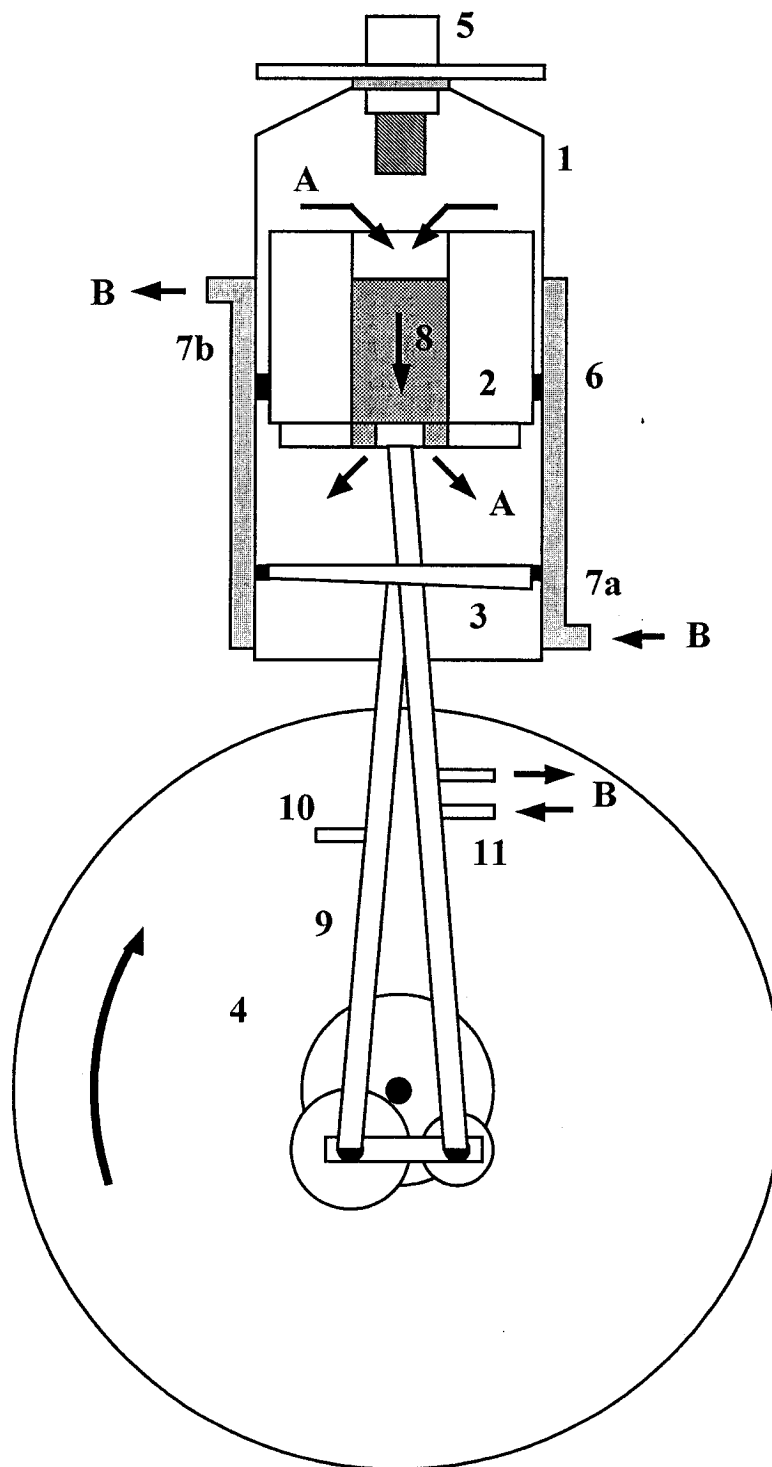
Om man via en regenerator återför hela Q_4 till Q_3 , så får den ideala Stirling-cykeln samma effektivitet som en Carnot-cykel.

$$\text{Hela } Q_4 \rightarrow Q_3 \text{ via regenerator} \Rightarrow \eta_{\text{Stirling}} = \eta_{\text{Carnot}} \quad (12)$$

Om man inte har perfekt återföring via regenerators men ändå en ideal Stirling-cykel, så måste man veta den tillförda värmemängden för att kunna beräkna effektiviteten. Detta kräver vanligtvis tillgång till tabellerade värden på den inre energin. Om det arbetande mediet kan betraktas som en ideal gas, t.ex. om man har luft vid rumstemperatur, så förenklas det hela däremot. Enligt (11) så är då det utförda (tillförda) arbetet under isotermer det samma som den tillförda (bortförda) värmen.

2 Utrustning

Maskinens uppbyggnad framgår av figur 4. Siffror inom parentes hänvisar i detta avsnitt till figur 4.



Figur 4: **Varmluftsmotor**. Pilarna representerar luftflödet genom regeneratoren (A), samt kylvatten flöden (B). Luftflödet kan reverseras.

Maskinen består i princip av en precisionsslipad glascylinder (1) med två rörliga kolvar (2), (3) kopplade till ett svänghjul (4). I cylinderns övre del kan man skruva fast en fläns med antingen en uppvärmningsanordning (5) (glödspirals) eller ett provrör. Provröret kan fyllas med vatten för att studera kylmaskins- eller värmepumpsfunktionen. Den undre delen omges av en kylmantel (6) av plast, med inläpp (7a) och utlopp (7b) för kylvattnen. Förflyttningsskolven (2) svarar för transporten av gasen från den varma till den kalla delen av cylindern och tvärt om. Arbetskolven (3) som rör sig med en fasförskjutning på 90° relativt förflyttningsskolven svarar för kompressionen (expansionen) av gasen. Arbetskolven isolerar gasen från omgivningen varför man tar ut eller tillför arbete via den kolven.

Förflyttningsskolven är tillverkad i värmebeständigt glas och dess undre ända är försluten med en vattenkyld metallplatta med radiella slitsar som låter luften passera under värmeväxling. Denna kolv har givits en speciell utformning med en axiell kavitet fylld med kopparull (8). Kopparullens funktion är att ta upp värme när gasen passerar till den kallare delen av cylindern för att åter avge värme när gasen passerar i motsatt riktning. På så sätt bevaras en del värme "inom systemet" och verkningsgraden ökar.

Kolvorna är med vevstakar kopplade till ett tungt svänghjul (4) för att ge maskinen en jämn gång.

Kylvattnet till förflyttningsskolven (2) tillförs och bortförs genom vevstaken, vilken har kanaler samt inläpp och utlopp för vattnet (11).

På arbetskolvens vevstake (9) finns ett uttag (10) för mätning av trycket i cylindern via en kanal i vevstaken. Uttaget kan förslutas med t ex en gummipropp eller anslutas till en pV-indikator för avbildning av processens pV-diagram.

Svänghjulet är försett med kilspår för anslutning till andra maskiner (t ex experimentmotor). Ett handtag kan (tillfälligt) monteras på svänghjulet när man önskar detaljstudera händelseförloppet genom att vrida svänghjulet för hand.

pV-indikatorn består av ett spegelarrangemang som är vridbart i horisontell och vertikal led. Den arbetande gasens volymvariationer leds från arbetskolven via ett snöre till spegelhållarens horisontella rörelse. Tryckvariationerna kan överföras via en smal PVC-slang till spegelns vertikala rörelse. Om man belyser spegeln på lämpligt sätt kan man alltså på en skärm iakttaga samtidiga variationer i tryck och volym hos den inestängda gasen. Vi har skaffat oss ett pV-diagram för processen.

3 Uppgifter

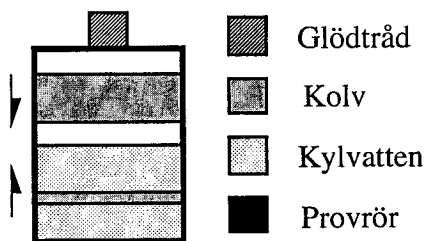
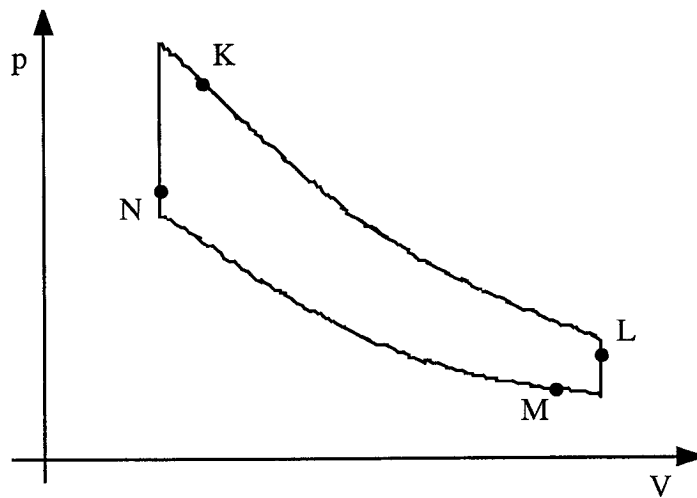
3.1 Studium av Stirling-cykeln.

Avsikten med den här uppgiften är att du ska förstå hur Stirling-cykeln fungerar, samt hur den realiseras i just den varmluftsmotor som används i denna laboration.

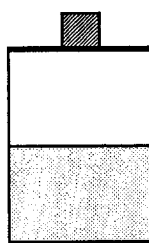
Anslutningen för pV-indikatorns tryckslang ska vara förseglad med en gummipropp.

Låt glödtråden vara monterad, men utan glödström. Vrid runt svänghjulet för hand, med hjälp av handtaget, och studera kolvarnas rörelse.

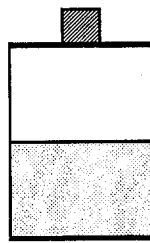
Vrid svänghjulet medurs, och identifiera de positioner för kolvarna som motsvarar punkterna K-N i pV-diagrammet nedan. Markera även genomloppsriktningen i pV-diagrammet. Kolvarnas positioner och deras rörelseriktningar ska markeras i cylinderdiagrammen nedan.



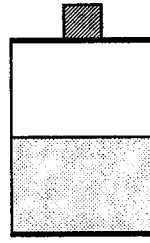
Exempel



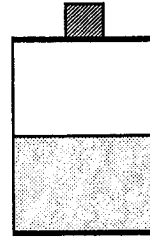
K



L



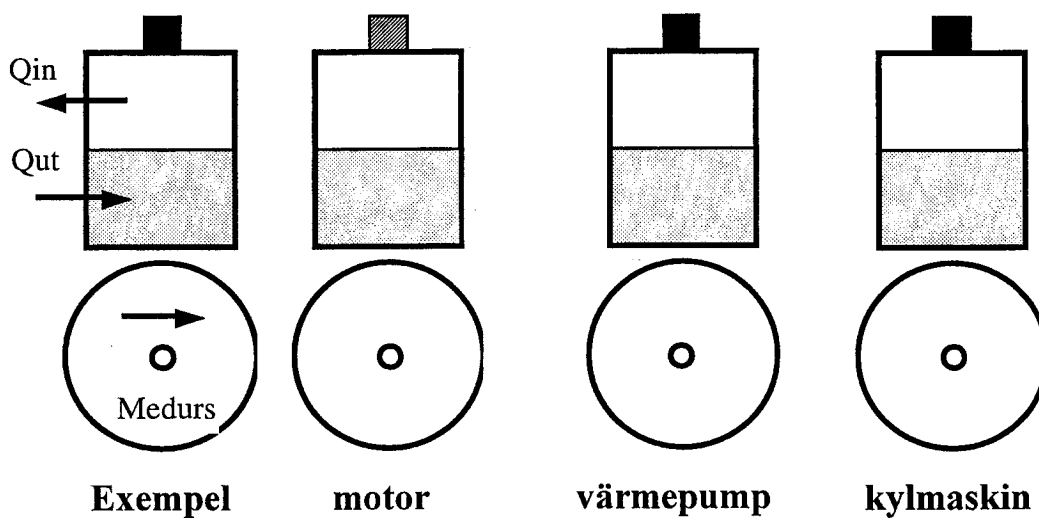
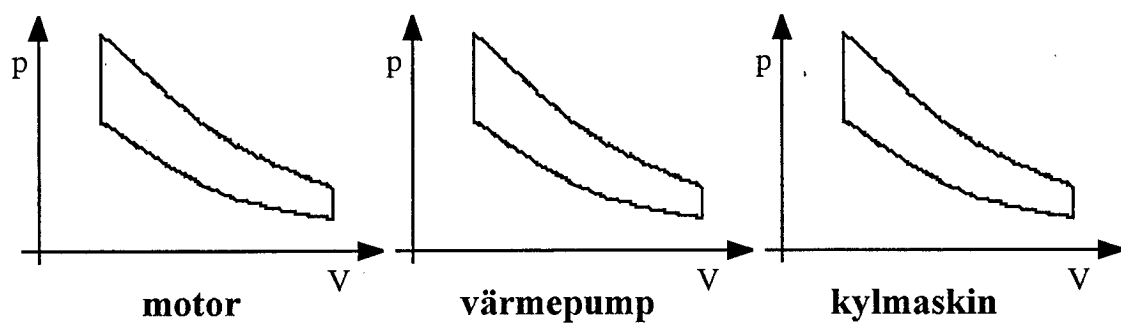
M



N

När du kopplar in glödströmmen i senare uppgifter (inte nu) kommer svänghjulet att börja rotera, d.v.s. maskinen fungerar som motor. Om du istället ersätter glödtråden med ett provrör med vatten (gör detta senare), så kan du värma eller kyla vattnet. Men för detta krävs att du tillför arbete, vilket vi här gör med hjälp av den elektriska motorn. Maskinen fungerar då istället som värmepump respektive kylmaskin.

Du ska nu lista ut genomloppsriktningar och värmeflöden i pV-diagram för de olika fallen (jmf. figur 3), och markera dessa i diagrammen nedan. Fundera även på hur svänghjulet ska rotera, samt var i cylindern värme tillförs respektive bortförs. Markera detta i maskindiagrammen nedan!



3.2 Kylmaskin / värmepump

Du ska i denna uppgift använda maskinen för att först kyla och sedan värma vatten. Avsikten är att visa att det du gjort i den tidigare uppgiften stämmer.

Fyll provröret med 0,5 - 1,0 centimeter vatten. Tag ej mer! Ersätt sedan glödtråden med provrörsflänsen. Mät temperaturen med en termometer.

Om du inte redan har smort maskinen, så är det dags att smörja den nu. Fråga handledaren hur du ska göra!

Kontrollera att kylvattnet är inkopplat!

Koppla in den elektriska motorn så att du kyler vattnet i röret. Starta maskinen och tag tiden. Låt ej termometern frysa fast i röret.

Det tog _____ minuter för vattnet att frysa.

Värm nu istället vattnet så att isen smälter.

Det tog _____ minuter för isen att smälta.

Fortsätt att värma vattnet tills dess det är 60°C varmt.

Det tog _____ minuter att värma vattnet till 60°C.

Jämför tiderna för att frysa och smälta vattnet. Är de lika långa? _____

I så fall varför/varför inte? _____

Varifrån tas värmen när du värmer vattnet? _____

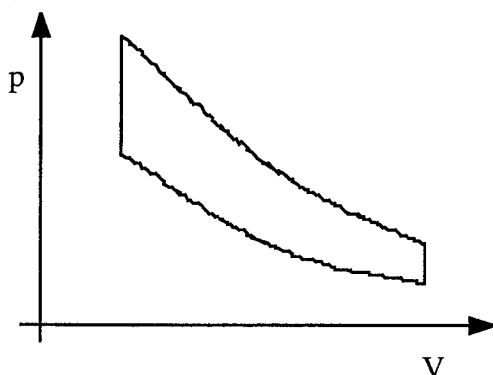
3.3 Cykel i pV-diagram.

Avsikten med den här uppgiften är att du ska jämföra den här maskinens cykel med den ideala Stirling-cykeln.

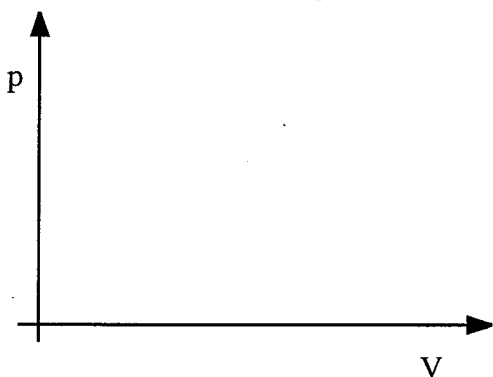
Koppla bort den externa motorn och sätt på glödtråden igen (utan ström). Anslut pV-indikatorns tryckslang. Om lampan är rätt inriktad så ska ett pV-diagram avbildas på den vita tavlan när du vrider runt svänghjulet. Kontrollera detta!

Fäst därefter ett mm-papper på tavlan så att du kan avbilda cykeln.

Vrid runt svänghjulet för hand och rita av cykeln. Gör sedan en skiss nedan!



ideal Stirling



verklig Stirling

Förklara eventuella skillnader! _____

3.4 Motor

Du ska nu använda maskinen som motor. Avsikten med den här uppgiften är att mäta motorns effektivitet på två olika sätt.

Men innan du börjar så ska du smörja maskinen igen.

Maskinen får aldrig stå stilla med glödströmmen påslagen. Du kan ha strömmen på om du vrider runt svänghjulet för hand, men endast under en kort tid!

När du ska starta motorns så vrid först upp glödspänningen till 16 V. När glödtråden börjar glöda så starta motorn genom att rotera svänghjulet för hand. Om detta inte fungerar så vrid ner spänningen och kontakta assistenten!

Båda metoderna för att mäta effektivitet ska genomföras vid två olika glödspänningar, 12 och 16 volt.

3.4.1 Effektivitet från bromsprov.

Du ska mäta den effekt som motorn kan avge genom belastning av axeln på svänghjulet. Denna axel skulle kunna tänkas vara den utgående axeln, vilken t ex driver en propeller.

Du belastar axeln med ett kopparband. Detta orsakar en normalkraft, vilket leder till en friktionskraft. Det är denna friktionskraft som belastar motorn. För att mäta krafter har du tillgång till dynamometrar.

Låt motorn stabiliseras i ett par minuter efter ändring av glödspänningen innan du genomför några mätningar!

För att få en rimlig belastning så ska du mäta tomgångsvarvtalet. Det är lagom att bromsa motorn till ungefär halva varvtalet. Registrera det belastade varvtalet, friktionskraften, spänningen och strömmen vid varje mätning!

Spänning (V)	Ström (A)	Ineffekt (W)	Varvtal (s ⁻¹)	Frik.-kraft (N)	Uteffekt (W)	η (%)
12,0						
16,0						

Uteffekten kan beräknas enligt

$$P_{ut} = \omega M,$$

där ω är vinkelfrekvensen och M är momentet som orsakas av friktionskraften.

Axelns diameter är känd (25 mm). Ineffekten kan antas vara den elektriska effekt som levereras till glödtråden. Verkningsgraden (effektiviteten) blir då

$$\eta = P_{\text{ut}} / P_{\text{in}} .$$

Fundera på hur du kan mäta och/eller räkna ut friktionskraften!

3.4.2 Effektivitet ur pV-diagram.

Man kan även mäta effektivitet ur pV-diagram, under vissa antaganden.

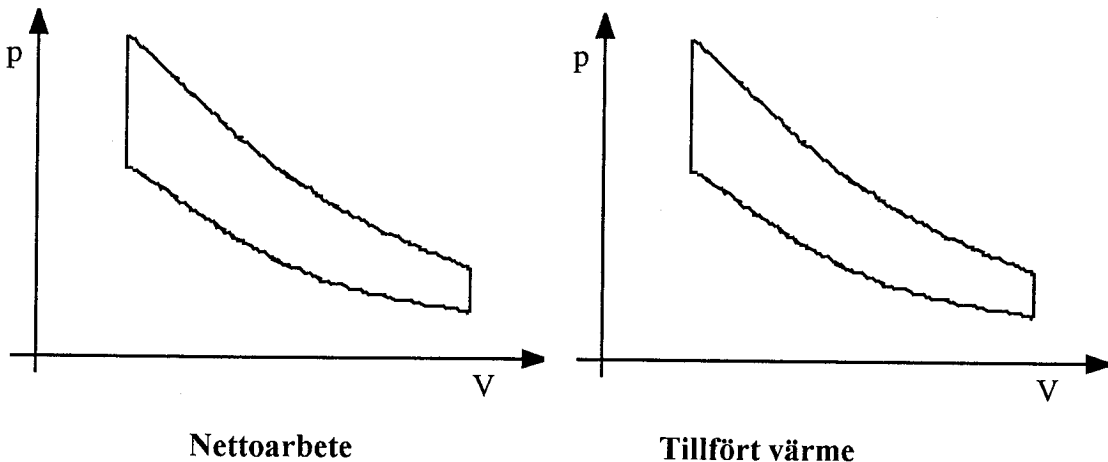
Du ska registrera pV-diagram på den vita tavlan. Använd mm-papper.

Låt motorn stabiliseras i ett par minuter efter ändring av glödspänningen innan du genomför några mätningar!

Verkningsgraden definieras som

$$\eta_{\text{motor}} = W_{\text{netto}} / Q_{\text{tillfört}} .$$

Nettoarbete och tillfört värme kan beräknas som areor i pV-diagram. Markera nedan de aktuella areorna!



För att kunna beräkna tillfört värme ur pV-diagram, så måste man göra vissa antaganden. Vilka då? _____

De diagram du får fram saknar absoluta skalor (kalibrering). Behöver du kalibrera någon av skalorna? Motivera! _____

Spänning (V)	W_{netto}	$Q_{\text{tillfört}}$	η (%)
12,0			
16,0			

Glödtrådens temperatur är ungefär 4000 K. Vilken effektivitet (i %) skulle maskinen ha haft om det hade varit en ideal Stirling-cykel med perfekt regeneration? _____

Jämför effektiviteterna ovan med de vid bromsproven. Förklara eventuella avvikelser!

Är det någon skillnad för de olika glödspänningarna? Förklara! _____

4 Inlämningsuppgifter

Dessa skall vara utförda innan laborationen får påbörjas. Riv loss detta blad och lämna in det till assistenten vid laborationens början!

- 1) Hur många storheter behövs för att fullständigt beskriva ett termodynamiskt tillstånd för en gas eller vätska? Ge exempel på storheter! _____

- 2) Vad kallas den kontur i ett termodynamiskt diagram som förbinder tillstånd med samma temperatur? _____
- 3) Vilken cykel har den högsta teoretiska effektiviteten? Hur stor är den om $T_L = 1000 \text{ K}$ och $T_H = 2000 \text{ K}$? _____
- 4) Vilken storhet fås som areor under processkurvor i TS-diagram? _____

- 5) Hur stor är ändringen av den inre energin efter ett helt varv i en cykel? Varför?

- 6) Vilka storheter beror den inre energin hos en ideal gas av? _____

- 7) Vilken storhet fås vanligtvis som areor i pV-diagram? _____
Om vissa speciella förutsättningar är uppfyllda kan man även få värme ur pV-diagram. Vilka förutsättningar? _____

- 8) Vad kan man göra för att höja effektiviteten hos Stirling-cykeln? Vilken effektivitet kan man då uppnå? _____

- 9) Om Stirling-cykeln genomlöps moturs i pV-diagrammet, har man då ett positivt eller negativt nettoarbete? _____

Namn: _____ Linje _____ Datum _____