

# Övningsmaterial inom Termodynamik med kompressibel strömning

Tony Burden, Arne Karlsson & Nils Tillmark  
Institutionen för mekanik,  
KTH, Stockholm

Version 1.0  
mars 2006

## **Förord**

Övningsmaterialet består av inlärningsövningar, övningsuppgifter och facit.  
Version 1.0 är framtagen för läsåret 2005/06.

Denna lunta är INTE TILLÅTEN som hjälpmedel vid skrivningar.

# Contents

1	Den första huvudsatsen och $p$ - $V$ -arbete.	3
2	Ideala gaser.	5
3	Vätskor och gaser.	8
4	Strömning genom öppna system.	10
5	Kompressibel strömning.	13
6	Den andra huvudsatsen.	16
7	Kretsprocesser.	18
8	Entropi.	19
9	Stötvågor.	21
10	Exergi.	23
A	Facit	25

# 1 Den första huvudsatsen och $p$ - $V$ -arbete.

## 1.1 Inlärningsövningar

1. En mängd gas vid förhöjt tryck och förhöjd temperatur innesluts i en cylinder av en kolv. Gasen tillåts expandera ganska snabbt så att den utför relativt mycket arbete, 60 kJ, samtidigt som enbart 5 kJ går förlorat som värme. Hur stort är  $W$ ? Hur stort är  $Q$ ? Hur ändras gasens inre energi? (Var noga med tecknen i dina svar.)
2. Mängden gas i frågeställningen ovan är 0,10 kg. Hur stort är  $w$ ? Hur stort är  $q$ ? Hur ändras gasens specifika inre energi? (Var noga med måtenheterna i dina svar.)
3. En mängd gas, som är innesluten i en cylinder av en kolv, komprimeras samtidigt som den kyls. Kolven utför 50 kJ arbete på gasen medan den kyls på precis det sätt som krävs för att dess inre energi ska förbli oförändrad. Hur stort är det tillförda värmnet  $Q$ ? (Var noga med tecknen i ditt svar.)
4. När 1 liter bensin (oktan) förbränns, dvs oxideras i luft, omvandlas 34 MJ inre energi från kemisk bindningsenergi till en temperaturhöjning i gasblandningen. Under vissa konstanta körförhållanden omvandlar en viss bilmotor 9 MJ av denna energi till arbete, tex arbete utfört mot luftmotståndet (drag). Hur mycket värme måste kylas bort från motorn för att hålla dess temperatur konstant? Vilket är det termodynamiska system som du har använt för att komma fram till ditt svar? Kan du utföra analysen för andra val av 'system'?

## 1.2 Större uppgifter.

1. Utvecklingsavdelningen vid företaget Noozone AS har utfört mätningar på kylmediet 134a. I försök A expanderade 0,225 kg vätska vid 46,3 °C och 1,2 MPa till gas vid 20,0 °C och 140 kPa. Kylmediet värmdes med 59,5 kJ under processen. I försök B komprimerades 0,0908 kg gas vid 20,0 °C och 140 kPa reversibelt till vätska vid 46,3 °C och 1,2 MPa. Kompressionsarbetet var 5,5 kJ medan 17,3 kJ värme fördes bort under processen. Beräkna den mängd arbete som utfördes av kylmediet i försök A.
2. Mätningar utförs på två olika mängder koldioxid som genomgår olika processer. Begynnelsestillståndet i båda processerna är ett jämviktstillstånd med temperatur 357 K och tryck 14,1 MPa. Sluttillståndet i båda processerna är ett jämviktstillstånd med temperatur 300 K och tryck 7,06 MPa. (Koldioxids kritiska tryck och temperatur är 7,39 MPa och 304 K.) I försök A expanderar 3,00 g koldioxid adiabatiskt och utför 42,4 J arbete. I försök B tillförs 5,00 g koldioxid 24,3 J som värme. Beräkna det arbete som utförs av koldioxiden i försök B.
3. En blandning vatten och vattenånga med massan 0,10 kg har från början volymen 0,017 m<sup>3</sup> vid trycket 1,0 MPa. Blandningen expanderar kvasistatiskt till ren vattenånga vid 100 kPa medan produkten  $p \times V$  hålls konstant. I begynnelsetillståndet är  $T = 453$  K och  $u = 765,7$  kJ/kg och i sluttillståndet är  $T = 373$  K och  $u = 2506,1$  kJ/kg.

Beräkna den mängd värme som förs till blandningen under expansionen. Var noga med att ange rätt tecken i ditt svar.

4. En sluten mängd kylmedel 134a expanderar reversibelt med produkten  $pv$  konstant. I begynnelsestillståndet är trycket 800 kPa och volymen 5,0 dl medan den specifika volymen är 0,01071 m<sup>3</sup>/kg och den specifika inre energin är 153,16 kJ/kg. I sluttillståndet är trycket 80,0 kPa och den specifika inre energin är 100,16 kJ/kg. Under hela processen består kylmedlet av en blandning av vätska och ånga d v s gas. Beräkna det värme som förs till kylmedlet under processen. Var noga med att ange rätt tecken i ditt svar.
5. Några forskare mäter den inre energin i vanligt vatten, H<sub>2</sub>O. 0,2015 liter vatten vid 80°C och 100 kPa ställs in i en särskild behållare som håller trycket konstant genom att låta volymen varierar. (Tänk på en vertikal cylinder som är tillsluten av en tung och fritt rörlig kolv.) Vattnet tillförs 104,8 kJ som värme med följderna att temperaturen stiger till 100°C. Volymen ökar till hela 65,6789 liter eftersom en femtedel av vätskan förångas. Beräkna ändringen i inre energi hos 'vattnet', d v s mängden H<sub>2</sub>O.

## 2 Ideala gaser.

Gasen i uppgifterna i detta avsnitt ska antas uppföra sig som en ideal gas med konstant  $\gamma = c_p/c_v$  där värdet hos  $\gamma$  ska väljas som det relevanta av  $\frac{5}{3} = 1,67$ ,  $\frac{7}{5} = 1,40$  och  $\frac{8}{6} = 1,33$ . Se avs 2.2 i sammanfattningen 'Termo T konc'.

### 2.1 Inlärningsövningar

1. Beräkna den specifika gaskonstanten,  $R$ , hos kvävegase (N<sub>2</sub>). Molmassan är  $\mathcal{M} = 28,01$  kg/kmol.
2. Beräkna den specifika gaskonstanten,  $R$ , hos syregase (O<sub>2</sub>). Molmassan är  $\mathcal{M} = 32,00$  kg/kmol.
3. Beräkna den specifika volymen i luft vid 20 °C och 101 kPa.
4. Beräkna värdet hos  $c_v$  i kvävegase (N<sub>2</sub>). Molmassan är  $\mathcal{M} = 28,01$  kg/kmol.
5. Beräkna värdet hos  $c_v$  i koldioxid (CO<sub>2</sub>). Molmassan är  $\mathcal{M} = 44,01$  kg/kmol.
6. Beräkna skillnaden i specifik inre energi,  $u$ , mellan luft vid 600 K och 1,0 MPa och luft vid 300 K och 101 kPa.

### 2.2 Joules lag.

1. En mängd luft vid 600 kPa och 294 K är från början instängd i en volym 0,50 liter. Först expanderas luften kvasistatiskt och isobart tills volymen har fördubblats,  $V_2 = 2V_1$ . Sedan halveras trycket i luften kvasistatiskt och isokort,  $p_3 = \frac{1}{2}p_2$ . Beräkna den totala ändringen i luftens inre energi,  $U_3 - U_1$ , och var noga med att ange rätt tecken i ditt svar.
2. Förr i tiden hade institutionerna för mekanik och flygteknik en anläggning för komprimering och lagring av luft vid högt tryck för överljudsvindtunnlar. Lokalen i Teknikringen 8 var byggd så att ett eventuellt övertryck skulle trycka en utevägg utåt (mot Betongforskning) utan att orsaka skador inne i byggnaden. För uppgiftens skull utgår vi ifrån att anläggningen innehöll fem tankar som var och en innehöll 3 m<sup>3</sup> luft vid 600 kPa och rumstemperatur. Själva lokalen hade dimensioner 8 m × 5 m × 4 m och var isolerad för att kunna hålla rumstemperatur även under vintertid. Antag att luften läcker ut ur alla fem tankar, samtidigt som lokalen håller tätt, tills trycket har jämnat ut sig mellan tankarna och lokalen i övrigt. Vilket övertryck,  $p - p_{\text{atm}}$ , kommer att råda i luften i lokalen? Motivera din beräkning mycket noga.
3. Tre ballonger läggs ned i en stel låda som rymmer 24 liter och locket stängs igen helt tätt. Varje ballong har från början volym 4 liter, motsvarande en diameter 20 cm, och har fyllts till ett övertryck  $p - p_{\text{atm}} = 400$  kPa. Från början är hela lådans innehåll vid en och samma rumstemperatur. Efter några dagar, eller t o m veckor, har luft pyst ut ur ballongerna tills trycket inuti ballongerna är detsamma som trycket i luften i lådan i övrigt. Då är lådans innehåll återigen vid samma rumstemperatur som vid början.

- a) Beräkna det slutliga trycket.
- b) Hur mycket värme har förts till lådans innehåll under processen? Motivera noga.

### 2.3 Isoterma processer.

1. En mängd atmosfärsluft vid  $18\text{ }^\circ\text{C}$  och  $101\text{ kPa}$  stängs in i  $800\text{ cm}^3$  i en cylinder av en fritt rörlig kolv. Luften komprimeras kvasistatiskt och isotermt, dvs relativt långsamt, tills trycket är  $600\text{ kPa}$ . Beräkna det värme som tillförs luften under kompressionen och var noga med att ange rätt tecken i ditt svar.
2. Efter den isoterma kompressionen i en Stirling kretsprocess har arbetsmediet, en sluten mängd luft, temperatur  $25\text{ }^\circ\text{C}$  och tryck  $600\text{ kPa}$ . Det tillförde värmets under den efterföljande isokora uppvärmningen är  $800\text{ kJ/kg}$ . Luften expanderar sedan isotermt från  $1,0$  liter till  $6,0$  liter. Beräkna det tillförda värmets under den isoterma expansionen. Var noga med att ange rätt tecken i ditt svar.
3. Luft vid  $100\text{ kPa}$  och  $20\text{ }^\circ\text{C}$  komprimeras reversibelt och isotermt från  $1,00$  liter till  $0,20$  liter. Beräkna det värme,  $Q$ , som förs till luften under processen.

### 2.4 Polytropa processer och adiabatiska processer.

1. Uppgiften handlar om en 'tankning' av en bil som drivs med tryckluft. Luft vid  $10\text{ }^\circ\text{C}$  och atmosfärstryck ska komprimeras till  $20\text{ MPa}$  och  $150$  liter. Antag att kompressorn är optimal i den mening att kompressionen sker friktionsfritt och utan värmeförluster. Då kommer temperaturen att höjas samtidigt som trycket. Eftersom tanken inte är termiskt isolerad kommer temperaturen i luften i tanken sedan att sjunka tillbaka till temperaturen i omgivningen med följden att en del av kompressionsarbetet går förlorat genom en värmeförlust. Antag att luften först komprimeras till  $150$  liter och högt tryck för att sedan kylas ned till  $10\text{ }^\circ\text{C}$  och  $20\text{ MPa}$ . Skissera hela processen i ett  $p$ - $V$ -diagram och beräkna den mängd värme som förs bort från tryckluften under nedkylningen.
2. En mängd luft vid  $700\text{ kPa}$  och  $20\text{ }^\circ\text{C}$  innesluts i en volym  $2,0\text{ dl}$  i en cylinder av en rörlig kolv. Luftmängden tillåts expandera reversibelt till volymen  $1,00$  liter i en process under vilken trycket,  $p$ , i luften relateras till luftmängdens volym,  $V$ , genom att  $pV^{1,20}$  hålls konstant. Beräkna den mängd värme som förs över mellan luftmängden och dess omgivning under processen. Var noga med att ange riktningen hos denna värmeöverföring i ditt svar.
3.  $860\text{ cm}^3$  luft befinner sig efter kompressionsslaget i en Diesel kretsprocess vid  $900\text{ K}$  och  $5,40\text{ MPa}$ . Luften tillförs först  $16,0\text{ kJ}$  värme vid konstant tryck. Sedan expanderar luften reversibelt och adiabatiskt till  $15\,500\text{ cm}^3$ .
  - a) Beräkna trycket vid slutet av den adiabatiska expansionen.
  - b) Beräkna det arbete som utförs under hela expansionen, inkl uppvärmningen.

## 2.5 Diverse.

1. Inför bytet från vinterdäck till sommardäck finner Roine att ett av däcken innehåller luft vid enbart atmosfärstrycket, 101 kPa. Däcket måste fyllas på med luft tills trycket har stigit till 220 kPa. Antag att volymen luft i däcket är  $0,030 \text{ m}^3$  oberoende av trycket. Är det möjligt att utifrån denna information uppskatta det arbete som erfordras för att pumpa mer luft i däcket tills trycket är 220 kPa? Varför inte? Formulera en någorlunda rimlig beräkningsmodell och uppskatta det arbete som erfordras.

## 3 Vätskor och gaser.

### 3.1 Inlärningsövningar — vätskor.

1. Hur mycket värme behövs för att höja temperaturen i 1 liter vatten från  $10^\circ\text{C}$  till  $20^\circ\text{C}$  vid 101 kPa?
2. Beräkna skillnaden i specifik inre energi,  $u$ , mellan vatten vid  $20^\circ\text{C}$  och 1,0 MPa och vatten vid  $10^\circ\text{C}$  och 101 kPa.
3. Beräkna skillnaden i specifik inre energi,  $u$ , mellan vatten vid  $20^\circ\text{C}$  och 520 kPa och vatten vid  $20^\circ\text{C}$  och 100 kPa.

### 3.2 Större uppgifter — fasomvandling och verkliga gaser.

1. En mängd vätska förvaras vid mycket låg temperatur i en isolerad tank. På grund av den låga temperaturen läcker värme in genom tankens väggar, med den konstanta hastigheten  $\dot{Q}$ , med följd att vätskan förångas till gas. För att undvika en tryckhöjning i tanken tillåts gasen strömma ut genom en ventilationsöppning. Låt  $v_f$  och  $v_g$  beteckna de specifika volymerna hos vätskan respektive gasen och  $h_{fg}$  vara det specifika ångbildningsvärmets. Uttryck massflödet,  $\dot{m}_{\text{ut}}$ , ut ur tanken som en funktion av dessa övriga storheter inklusive  $\dot{Q}$ .
2. 1,0 kg vatten ( $\text{H}_2\text{O}$ ) förångas reversibelt och isobart vid 9,593 kPa och  $45^\circ\text{C}$  i en sluten behållare med varierbar volym. Uppskatta ändringen i volymen då (mass-) andelen ånga ökar från 40% till 60%. Vid 9,593 kPa och  $45^\circ\text{C}$  kan vätskan vatten modelleras som inkompressibel materie med masstäthet  $990,2\text{ kg/m}^3$  och värmekapacitet  $4,176\text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ . Vid samma tryck och temperatur kan vattenånga modelleras som en ideal gas med molmassa  $18,02\text{ kg/kmol}$  och kvoten  $c_p/c_v = 1,332$ . Ångbildningsentalpin är  $2394,8\text{ kJ/kg}$ . Var noga med att ange huruvida volymen ökar eller minskar. Uppgiftstexten innehåller en del information som är helt överflödig.
3. Mättad vattenånga vid 1,5 MPa innesluts i 5,0 liter =  $0,0050\text{ m}^3$  i en cylinder av en rörlig kolv. Enligt ångtabeller är ångans temperatur  $198,3^\circ\text{C}$  och dess specifika volym är  $0,1318\text{ m}^3/\text{kg}$ . Ångan expanderar vid konstant temperatur tills dess volym har fyrdubblats,  $V_2 = 4,0V_1$ . Modellera vattenångan med van der Waals gaslag, med  $a = 2,627\text{ kPa}(\text{m}^3/\text{kg})^2$  och  $b = 0,720 \times 10^{-4}\text{ m}^3/\text{kg}$ , och beräkna den mängd värme som förs till ångan under den isoterma expansionen. Med hjälp av det allmänna uttrycket för  $du$  kan man visa att  $du = c_v dT + (a/v^2) dv$  i en gas som satisfierar van der Waals gaslag. Var noga med att ange ett korrekt tecken i ditt svar.  $\mathcal{M} = 18,02\text{ kg/kmol}$ .
4. En mängd koldioxid,  $\text{CO}_2$ , vid 310 K och 7,5 MPa innesluts i en del av en cylinder med volym 2,5 dl av en fritt rörlig kolv. Gasen expanderar medan produkten  $p \times V$  hålls konstant tills volymen har fördubblats. Expansionen är tillräckligt långsam för att kunna modelleras som reversibel. Koldioxids kritiska tryck och temperatur är 7,39 MPa och 304 K så koldioxid kan modelleras som en van der Waals gas under processen men inte som en ideal gas.



- a) Är det möjligt att beräkna gasmängdens massa? Motivera!
- b) Är det möjligt att beräkna ändringen i koldioxidens inre energi under expansionen?  
I så fall hur kommer man fram till ett numeriskt värde?
- c) Är det möjligt att beräkna det arbete som koldioxiden utför under expansionen?  
Motivera!
- d) Hur skulle det värme som förs till koldioxiden under expansionen kunna beräknas,  
om nu något värme förs till koldioxiden?

( $\mathcal{M} = 44,01 \text{ kg/kmol}$ ,  $a = 188,3 \text{ Pa}/(\text{m}^3/\text{kg})^2$ , och  $b = 0,973 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$ .)

5. Kylmedel 12 ( $\text{CCl}_2\text{F}_2$ ) förångas reversibelt och isobart vid 567 kPa och 20 °C i en del av en kylprocess, t ex ett luftkonditioneringsystem. Beräkna ändringen i volymen hos 10 g = 0,010 kg kylmedel då (mass-) andelen ånga ökar från 14% till 100%. Vid 567 kPa och 20 °C har kylmedel 12 följande egenskaper;

vätskefas:  $v_f = 0,7525 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$ ,  $u_f = 54,44 \text{ kJ/kg}$ , ;  
gasfas:  $v_g = 0,03078 \text{ m}^3/\text{kg}$ ,  $u_g = 178,32 \text{ kJ/kg}$ ,

Ångbildningsentalpin är 140,91 kJ/kg. Var noga med att ange huruvida volymen ökar eller minskar.

## 4 Strömning genom öppna system.

### 4.1 Inlärningsövningar

1. Beräkna masstätheten i luft vid  $20\text{ }^\circ\text{C}$  och  $101\text{ kPa}$ .
2. Beräkna värdet hos  $c_p$  i kvävegaz ( $\text{N}_2$ ). Molmassan är  $\mathcal{M} = 28,01\text{ kg/kmol}$ .
3. Beräkna värdet hos  $c_p$  i koldioxid ( $\text{CO}_2$ ). Molmassan är  $\mathcal{M} = 44,01\text{ kg/kmol}$ .
4. Beräkna skillnaden i specifik entalpi,  $h$ , mellan luft vid  $600\text{ K}$  och  $1,0\text{ MPa}$  och luft vid  $300\text{ K}$  och  $101\text{ kPa}$ .
5. Beräkna skillnaden i specifik entalpi,  $h$ , mellan vatten vid  $20\text{ }^\circ\text{C}$  och  $101\text{ kPa}$  och vatten vid  $10\text{ }^\circ\text{C}$  och  $101\text{ kPa}$ .
6. Beräkna skillnaden i specifik entalpi,  $h$ , mellan vatten vid  $20\text{ }^\circ\text{C}$  och  $520\text{ kPa}$  och vatten vid  $20\text{ }^\circ\text{C}$  och  $100\text{ kPa}$ .
7. Luft vid  $-20\text{ }^\circ\text{C}$  och  $50\text{ kPa}$  strömmar med hastigheten  $380\text{ m/s}$ . Beräkna stagnationstemperaturen i luften, d v s den temperatur som kommer att finnas i luften när den har bromsats in till vila utan energiförluster.

### 4.2 Gasturbiner m m.

Om inget annat anges ska gasen i uppgifterna i detta avsnitt antas uppföra sig som en ideal gas med konstant  $\gamma = c_p/c_v$ . Värdet hos  $\gamma$  ska väljas som det relevanta av  $\frac{5}{3} = 1,67$ ,  $\frac{7}{5} = 1,40$  och  $\frac{8}{6} = 1,33$ . Se avs 2.2 i sammanfattningen ‘Termo T konc’. Vattenångas molmassa är  $\mathcal{M} = 18,02\text{ kg/kmol}$ .

1. Vattenånga strömmar in i en lågtrycksturbin i kärnkraftsverket Forsmark 3 vid  $770\text{ kPa}$  och  $259\text{ }^\circ\text{C}$  och strömmar ut vid  $3,4\text{ kPa}$  och  $26\text{ }^\circ\text{C}$ . I detta område på  $p$ - $v$ - $T$ -ytan uppfyller vattenånga den ideala gaslagen med en noggrannhet som är ungefär 1%. Uppskatta det arbete, per enhetsmassa vattenånga, som turbinen bidrar med till elproduktionen genom att försumma både värmeförluster och ändringen i vattenångans rörelseenergi.
2. Vattenånga strömmar in i en turbin vid  $4,0\text{ MPa}$  och  $500\text{ }^\circ\text{C}$  och strömmar ut vid  $20\text{ }^\circ\text{C}$ . Det är känt att förlusterna, d v s värmeförluster tillsammans med en ev ökning i rörelseenergi, är  $219\text{ kJ}$  per kilogram ånga som strömmar genom turbinen. Med ångtabeller kan man beräkna att turbinens specifika arbetseffekt är  $1150\text{ kJ/kg}$ . Beräkna istället denna ‘effekt’, eller snarare specifika arbete, med idealgasmodellen.
3. Luft strömmar genom en välisolerad turbin med det konstanta massflödet  $5,81\text{ kg/s}$  medan turbinen utför arbete med effekt  $4110\text{ kW}$ . Luften strömmar in i turbinen vid  $1000\text{ kPa}$  och  $1400\text{ K}$ , och strömmar ut vid  $100\text{ kPa}$  och  $788\text{ K}$ . Rörelseenergin i strömningen är försumbar i en termodynamisk analys. Uppskatta det effektiva värdet hos den specifika värmekapaciteten vid konstant tryck.

4. Vattenånga strömmar genom en ångturbin med det konstanta massflödet 1,5 kg/s. Ångan strömmar in i turbinen vid 2,0 MPa och 360 °C, med en hastighet 50 m/s relativt turbinen och vid en höjd 6,0 m ovanför referensnivån. Ångan strömmar ut ur turbinen vid 100 kPa och 120 °C, med en hastighet 200 m/s relativt turbinen och vid en höjd 3,0 m ovanför referensnivån. Värmeförluster uppskattas till 8,5 kW. Beräkna det specifika axelarbete som turbinen utför med hjälp av tabellen nedan. ( $T_{\text{ref}} = 273,16 \text{ K}$  och  $p_{\text{ref}} = 611 \text{ Pa}$ .)

$p$	$T$	$v$	$u - u_{\text{ref}}$	$h - h_{\text{ref}}$	$s - s_{\text{ref}}$
100 kPa	27 °C	0,0010 m <sup>3</sup> /kg	113,25 kJ/kg	113,35 kJ/kg	0,3954 kJ/(kg · K)
100 kPa	120 °C	1,793 m <sup>3</sup> /kg	2537,3 kJ/kg	2716,6 kJ/kg	7,4668 kJ/(kg · K)
2,0 MPa	360 °C	0,1411 m <sup>3</sup> /kg	2877,0 kJ/kg	3159,3 kJ/kg	6,9917 kJ/(kg · K)

5. Luft strömmar med det konstanta massflödet 0,02 kg/s genom en kompressor. Luften tas in i kompressorn vid 100 kPa och 280 K och komprimeras till 600 kPa och 400 K. Värmeförlusterna under processen är 16 kJ/kg. Antag att ändringen i luftens rörelseenergi är försumbar och uppskatta den effekt som erfordras för att driva kompressorn.
6. Luft strömmar in i en turbin vid 1,0 MPa och 900 K och strömmar ut vid 100 kPa och 500 K. Strömningshastigheten i inloppet är försumbar jämförd med strömningshastigheten i utloppet som är 100 m/s. Turbinen utför arbete med effekt 3200 kW och med försumbara värmeförluster till omgivningen. Beräkna massflödet genom turbinen.

### 4.3 Vattenkraft m m.

I dessa uppgifter ska vatten antas uppföra sig som inkompressibel materia. Se avsnitt 2.1.2 och 2.1.3 i sammanfattningen 'Termo T konc'.

1. Efter islossningen kommer ytnivån i ett vattenmagasin i Norrland att ligga 75 m ovanför utloppet i det tillhörande kraftverket. Vattenmagasinets yta är så stor att rörelseenergin i vattnet i magasinet långt bort från magasinets utlopp kan försummas. Uppskatta den maximala mängd arbete (per kg strömmande vatten) som kraftverket kan utveckla. Försök att visa noga att ditt svar är just en övre gräns.

2. På Vattenfalls [www](http://www.vattenfall.se)-sidor (2004) kan man läsa om vattenkraftverket i Älvkarleby:

Effekt	126 MW
Fallhöjd	23 m
Normalårsproduktion	530 GWh
Maximal vattenföring genom turbinerna	700 kubikmeter per sek

Om det redovisade värdet hos effekten antas vara den effekt som uppnås då vattenflödet är maximalt visar en analys baserad på termodynamikens första huvudsats att det sker förluster i kraftverket. Uppskatta dessa förluster som en andel av den optimala effekt som kraftverket skulle kunna prestera teoretiskt sett.

3. En vattenpump, som kan vara lämplig för bostadshus med egna brunnar, ska konstrueras för att kunna lyfta vatten 15 m och skapa ett övertryck,  $p_{\text{ut}} - p_{\text{in}} = 400 \text{ kPa}$ , vid ett flöde 1,0 liter/s. Vattnet leds i rör av galvaniserat stål med inre diameter 5,0 cm och total längd 30 m. Strömningsförlusterna visar sig som värmeförluster tillsammans med en ev höjning av temperaturen i vattnet och kan uppskattas (specifikt) som  $\alpha \frac{1}{2} v^2$  där förlustkoefficienten  $\alpha = 22$  och  $v$  är strömninghastigheten i röret. Beräkna den effekt som pumpen ska dimensioneras för.
  
4. Någon gång i början av 1800-talet letar en ingenjör efter ett vattendrag som skulle kunna förse en fabrik med effekten  $20 \text{ hk} = 15 \text{ kW}$ . Han hittar ett vattendrag med ett flöde som är ca  $70 \times 10^6$  liter per dygn och som verkar kunna dämmas upp. Uppskatta den fallhöjd som fördämningen behöver åstadkomma.

## 5 Kompressibel strömning.

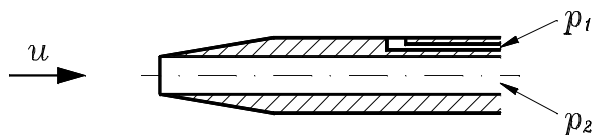
Om inget annat anges ska strömningen i uppgifterna i detta avsnitt antas var stationär, endimensionell, adiabatisk och reversibel (d v s isentrop). Se avsnitt 3.3 i sammanfattningen 'Termo T konc'.

Dessutom ska gasen i uppgifterna i detta avsnitt antas uppföra sig som en ideal gas med konstant  $\gamma = c_p/c_v$ . Värdet hos  $\gamma$  ska väljas som det relevanta av  $\frac{5}{3} = 1,67$ ,  $\frac{7}{5} = 1,40$  och  $\frac{8}{6} = 1,33$ . Se avsnitt 2.2 i sammanfattningen 'Termo T konc'.

### 5.1 Inlärningsövningar

1. Beräkna ljudhastigheten i luft vid  $20^\circ\text{C}$  och 101 kPa.
2. En personbil körs med hastigheten  $108\text{ km/h} = 30\text{ m/s}$  genom luft vid  $20^\circ\text{C}$  och 101 kPa. Beräkna machtalet för bilens hastighet genom luften.
3. Ett militärt flygplan flyger med hastigheten  $380\text{ m/s}$  genom luft vid  $-20^\circ\text{C}$  och 50 kPa. Beräkna machtalet för flygplanets hastighet genom luften.
4. Luft vid  $-20^\circ\text{C}$  och 50 kPa strömmar med hastigheten  $380\text{ m/s}$ . Beräkna stagnationsstrycket i luften.
5. Luft vid  $-20^\circ\text{C}$  och 50 kPa strömmar med hastigheten  $380\text{ m/s}$ . Beräkna stagnationstemperaturen i luften.

### 5.2 Adiabatisk och reversibel strömning.

1. I ett Prandtlrör (eng. Pitot-static tube) enligt figuren har man mätt upp trycken  $p_1 = 90\text{ kPa}$  respektive  $p_2 = 150\text{ kPa}$ . Hur stor är hastigheten  $v$  i den anströmmande luften? Det råder underljudsströmning och luftens temperatur är  $0^\circ\text{C}$ . (Strömningshastigheten betecknas med  $u$ , och inte  $v$ , i figuren.)  

2. Kvävgas ( $R = 594\text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$  och  $\gamma = 1,40$ ) strömmar ut från en stor tank och in i en lång kanal. I tanken är trycket 300 kPa och temperaturen 254 K. I början av kanalen har man placerat ett Prandtl-rör som mäter upp differensen mellan stagnationstrycket och det statiska trycket till 100 kPa. Hur stor är strömningshastigheten i denna punkt? Antag att strömningen från tanken in i kanalen sker förlustfritt.
3. Consider a blunt body in a flow field where the velocity  $V_\infty = 150\text{ m/s}$  and the temperature  $t_\infty = 20^\circ\text{C}$ . How large can the maximum surface temperature of the body be?

- When air is expanded isentropically to supersonic flow through a wind tunnel nozzle the temperature decreases. An upper boundary to the Mach number possible to obtain in the test section is given by the condensation temperature of air. Estimate this maximum Mach number for air with stagnation temperature  $T_0 = 300$  K assuming that air condenses at 50 K under the given circumstances.

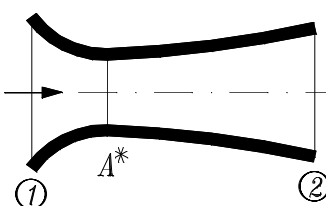
### 5.3 Dysströmning.

- Luft med stagnationstrycket  $p_0 = 500$  kPa expanderas isentropiskt genom en Laval-dysa till trycket  $p = 128,5$  kPa. Hur stor är dysans tvärsnittsarea i denna punkt om dysans minsta sektion är  $10 \text{ cm}^2$ ?

- Beräkna utloppsmachtalet  $M_2$  i en dysa enligt figuren. Strömningen i dysan är stötfri.

Ledning: Råder det över- eller underljudströmning efter den minsta sektionen i dysan?

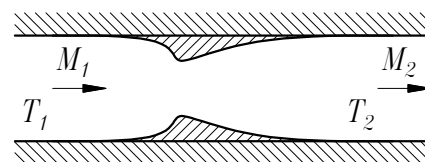
Givet:  $M_1 = 0,5$ ,  $A_1 = 10 \text{ cm}^2$ ,  $A_2 = 7,9 \text{ cm}^2$ ,  $A^* = 7,46 \text{ cm}^2$ ,  $p_1 = 200 \text{ kPa}$ ,  $p_2 = 88,0 \text{ kPa}$ .



- Helium ( $\gamma = 5/3 \approx 1,67$  och  $R = 2077 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ) förvaras i ett stort kärl vid trycket 200 kPa och temperaturen  $-30$  °C. Heliumgasen ska expanderas genom en Laval-dysa ut i en kanal med tvärsnittsarean  $2 \text{ cm}^2$ . I början av denna kanal vill man ha temperaturen 20 K. Vilken tvärsnittsarea erfordras i dysans minsta sektion? Antag att det inte förekommer några stötar i dysan eller kanalen.

- Koldioxid med stagnationstrycket  $p_0 = 300$  kPa och stagnationstemperaturen  $T_0 = 321$  K expanderas isentropiskt genom en Laval-dysa till Mach-talet  $M_1 = 1,50$ . Koldioxiden antas vara en ideal gas med det konstanta värdet  $k = 1,30$  på kvoten mellan de specifika värmekapaciteterna. Molmassan för koldioxid är  $\mathcal{M} = 44,01 \text{ kg}/\text{kmol}$ . Beräkna ändringen i specifik inre energi hos en liten fluidpartikel av koldioxid mellan stagnationstillståndet och det tillstånd som råder då machtalet är 1,50. Var noga med att ange om den inre energin ökar eller minskar!

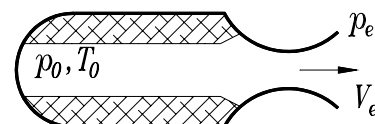
- Luft strömmar med underljudsmachtalet  $M_1 = 0,5$  genom en kanal. I denna kanal finns en förträngning i form av en konvergent-divergent dysa enligt figuren. Dysan och kanalen har sådan form att kanalens tvärsnitt är lika före och efter förträngningen. Luf-



ten expanderas genom förträngningen till överljudsmachtalet  $M_2$ . Hur stor är temperaturen  $T_2$  efter förträngningen om den är  $T_1 = 450$  K före denna?

- Luft ska expanderas från stagnationstillståndet  $p_0 = 300$  kPa och  $T_0 = 300$  K genom en Laval-dysa till trycket  $p = 150$  kPa. Hur stor är då strömningshastigheten?

7. Figuren visar en raketmotor. Vid förbränningen av bränslet skapas stagnationstillståndet  $p_0$  och  $T_0$  i förbränningsgaserna i förbränningsrummet. För förbränningsgaserna gäller att  $\gamma = 1,20$  och  $R = 480 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ .



Antag att förbränningsgaserna expanderas isentropiskt och med konstanta specifika värmekapaciteter till omgivningstrycket  $p_e$  och hastigheten  $V_e$  och bestäm  $V_e$ !

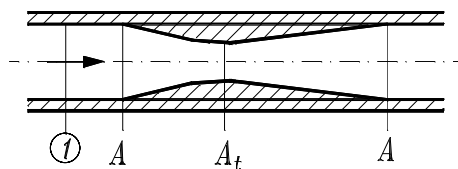
Givet:  $p_0 = 3,0 \text{ MPa}$ ,  $p_e = 80 \text{ kPa}$  och  $T_0 = 3000 \text{ K}$ .

8. Koldioxid ( $\gamma = 1,31$  och gaskonstanten  $R = 189 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ) förvaras i ett tryckkärl vid trycket  $300 \text{ kPa}$  och temperaturen  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ . Man vill överföra en del av denna koldioxid till en annan behållare där trycket är  $100 \text{ kPa}$  via en ventil.

- Visa att man får s.k. "choked flow" genom ventilen och
- bestäm öppningsarean på ventilen om det önskade massflödet är  $1 \text{ kg/s}$ .

Antag att strömningen genom ventilen är endimensionell och adiabatisk.

9. Figuren visar en enkel massflödesmätare. Denna består av en strypning i form av en dysa. Luft med stagnationstrycket  $p_0$  strömmar genom dysan. Tvärsnittsarean vid dysans utlopp är lika stor  $A$  som i rörledningen uppströms dysan och tvärsnittet i dysans minsta sektion är  $A_t$ . Massflödet kan under vissa betingelser bestämmas enbart genom kännedom om areorna  $A$  och  $A_t$  och genom mätning av trycket  $p_1$  och temperaturen  $T_1$  omedelbart uppströms dysan. Bestäm detta massflöde om  $A = 20 \text{ cm}^2$ ,  $A_t = 15 \text{ cm}^2$ ,  $p_1 = 120 \text{ kPa}$  och  $T_1 = 270 \text{ K}$  samt om machtalet  $M_1 < 1$ .



## 6 Den andra huvudsatsen.

### 6.1 Inlärningsövningar.

1. När 1 liter bensin (oktan) förbränns, dvs oxideras i luft, omvandlas 34 MJ inre energi från kemisk bindningsenergi till en temperaturhöjning i gasblandningen. Under vissa konstanta körförhållanden omvandlar en viss bilmotor 9 MJ av denna energi till arbete, t ex arbete utfört mot luftmotståndet (drag). Hur stor är motorns verkningsgrad?
2. När 1 liter bensin (oktan) förbränns i en bilmotor höjs temperaturen i gasblandningen till uppemot 3000 K. Uppskatta en teoretisk övre gräns för motorns verkningsgrad.
3. Uppskatta en övre gräns för den mängd arbete som en bilmotor kan utföra med 1 liter bensin som bränsle.

### 6.2 Motorer m m.

1. I utvecklingsavdelningen hos en motortillverkare utför en encylindrig fyrtaktskolvmotor arbete med 1,7 kJ/cykel. Med termokemi kan man beräkna att förbränning av bensin i luften i cylindern motsvarar en uppvärmning med 2020 kJ per kg färsk, dvs oförbränd, bränsle-luftblandning och 3,8 kJ/cykel.
  - a) Ger termodynamikens *första* huvudsats en möjlighet att beräkna en övre gräns ( $\leq$ ), ett exakt värde ( $=$ ), eller en undre gräns ( $\geq$ ) för de värmeförluster som dels kyls bort dels förs bort med avgaserna? Genomför den beräkning som är möjligt.
  - b) Ger termodynamikens *andra* huvudsats en möjlighet att beräkna en övre gräns ( $\leq$ ), ett exakt värde ( $=$ ), eller en undre gräns ( $\geq$ ) för motorns verkningsgrad?
  - c) Utför de nödvändiga uppskattningarna och kontrollera att de redovisade siffrorna inte strider mot termodynamikens *andra* huvudsats.
2. Kärnkraftsverken Forsmark 1 och Forsmark 2 levererar tillsammans 1900 MW till elnätet i Sverige. Vattenånga lämnar kärnreaktorerna vid 7 MPa och 286 °C medan 5400 MW värme överförs med kylvattnet till den s k Biotestsjön som kan sägas vara en del av Öregrund. Processen från uppvärmningen av vattenångan till nedkylningen av kylvattnet är invecklad men kan ändå betraktas som en kretsprocess ur synpunkten energiomvandling när du svarar på följande tre delfrågor. Gör rimliga uppskattningar av de värden som saknas.
  - a) Ger termodynamikens *första* huvudsats en möjlighet att beräkna en övre gräns ( $<$ ), ett exakt värde ( $=$ ), eller en undre gräns ( $>$ ) för det värme som tillförs vattenångan från kärnreaktorn? Motivera noga. Genomför den beräkning som är möjlig.
  - b) Ger termodynamikens *andra* huvudsats en möjlighet att beräkna en övre gräns ( $\leq$ ), ett exakt värde ( $=$ ), eller en undre gräns ( $\geq$ ) för den nämnda processens verkningsgrad? Genomför den beräkning som är möjlig.



- c) Kontrollera att de redovisade och relevanta siffrorna inte strider mot termodynamikens *andra* huvudsats.
3. Krille får en värmemotor med tillhörande värmeväxlare i julklapp från faster Cecilia. Vilken överraskning! Men vad spännande! Han fyller en termoskanna med 4,5 dl varmt kranvatten vid  $45^\circ\text{C}$  och börjar köra motorn med vattnet som varmt värmemagasin och inomhusluften som kallt värmemagasin.
- a) Förklara varför den maximala mängd arbete som värmemotorn kan prestera är bra mycket mindre än  $mc(T_1 - T_0) \approx 50 \text{ kJ}$  där  $m = \rho V$ .
- b) Visa att en rimligare övre gräns för det maximala arbetet har storleksordning 3 eller 4 kJ snarare än 50 kJ.
4. 'El på landet' blir en allt dyrare och dyrare utgiftspost för många storstadsbor och man kan undra om inte det går att generera lite el med hjälp av solens värmestrålning (solljus). Vatten skulle kunna värmas till t ex  $80^\circ\text{C}$  i solfångare på taket och sedan ledas in i en välisolerad tank där temperaturen inte sjönk under t ex  $60^\circ\text{C}$ . Det varma vattnet skulle sedan kunna driva en motor av Stirlingtyp som i sin tur drev en elgenerator. Ger termodynamikens andra huvudsats en möjlighet att uppskatta en undre gräns (' $\eta >$ '), ett exakt värde (' $\eta =$ '), eller en övre gräns (' $\eta <$ ') för verkningsgraden för denna process? Motivera ditt svar. Genomför den uppskattning som är möjlig. Ledningar: Solens yta har temperaturen 6000 K och el är att betraktas som helt ekvivalent med mekaniskt arbete ur den andra huvudsatsens synvinkel.

### 6.3 Kylprocesser och värmepumpar.

1. En frysbox är inställd på  $-20^\circ\text{C}$  och kondensorn, d v s den svarta värmeväxlaren på baksidan, har en temperatur av  $40^\circ\text{C}$ . För att hålla den inställda temperaturen behöver frysboxens elektriska motor utföra arbete med en effekt 64 W. Beräkna en övre gräns för den värmemängd som per tidsenhet läcker in i boxen.
2. Vid visningen av ett hus som fanns till salu i Sörmland uppgav den dåvarande ägaren att vardagsrummet var uppvärmt med s k jordvärme från en slinga utlagd under gräsmattan. Ägaren påstod att värmepumpsystemet drog 300 W, som eleffekt, och gav 2400 W som värme och att detta räckte till att hålla nästintill hela huset varmt året runt. Gör några rimliga antaganden om de relevanta temperaturerna och utför en termodynamisk bedömning av ägarens påstående.
3. Ett bra isoleringsmaterial kan ha värmekonduktivitet  $\lambda = 0,03 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ . Värmeflödet genom en platta med ytarea  $A$  och tjocklek  $d$  är då  $\dot{Q} = \lambda \Delta T A/d$  där  $\Delta T$  är temperaturskillnaden över plattan. Betrakta ett kylskåp som är isolerat med detta material men som i övrigt är ett helt vanligt kylskåp i ett vanligt kök. Uppskatta den eleffekt som krävs för att driva kylskåpet.

## 7 Kretsprocesser.

### 7.1 Inlärningsövningar.

1. Vilken, eller vilka, av Carnot-, Diesel-, Otto- och Stirlingkretsprocesserna har en verkningsgrad som är lika med den maximala verkningsgraden hos en generaliserad värmemotor, d v s verkningsgraden hos en reversibel (generaliserad) värmemotor.
2. En viss kretsprocess genomlöses moturs i  $p$ - $V$ -diagrammet. Motsvarar denna kretsprocess en värmemotor, en kylprocess eller en värmepump?
3. Vilken, eller vilka, termodynamisk storhet ges av den yta som innesluts av en kretsprocess i  $p$ - $V$ -diagrammet?

### 7.2 Kretsprocessanalyser.

1. En Diesel motor med kompressionsförhållandet  $V_{\max}/V_{\min} = 18$  och slagvolym  $V_{\max} - V_{\min} = 1700 \text{ cm}^3$  körs under förhållanden då förbränningen motsvarar ett tillfört värme  $1800 \text{ kJ/kg}$  per cykel och luften befinner sig vid  $141 \text{ kPa}$  och  $26^\circ\text{C}$  vid början av kompressionsslaget. Modellera denna motor med en s k idealiserad Diesel kretsprocess med standard idealiserad luft som arbetsmedium.
  - a) Skissera processen i ett  $p$ - $V$ -diagram.
  - b) Bestäm den temperatur och det tryck vid vilka förbränning inleds i denna modell.
  - c) Bestäm det värme som förs bort per cykel i denna modell.
  - d) Bestäm det specifika arbete som utförs netto per cykel.
  - e) Bestäm kretsprocessens verkningsgrad.
  - f) Kontrollera värdet hos verkningsgraden m h a den andra huvudsatsen..

## 8 Entropi.

### 8.1 Inlärningsövningar.

1. 0,33 kg vatten vid 100 °C och 101 kPa förångas reversibelt till vattenånga vid 100 °C och 101 kPa genom att det tillförs 746 kJ värme. Beräkna ändringen i vattnets entropi. (Var noga med måtenheter i ditt svar.)
2. En mängd luft utför 290 J arbete reversibelt medan temperaturen hålls konstant vid 17 °C. Beräkna ändringen i luftens entropi. (Var noga med måtenheter i ditt svar.)
3. Trycket i 1,0 liter vatten vid 20 °C höjs reversibelt från 100 kPa till 520 kPa medan temperaturen hålls konstant. Beräkna ändringen i vattnets entropi.

### 8.2 Större uppgifter.

1. Is vid 0 °C värms till vattenånga vid 100 °C. Hela processen sker kvasistatiskt vid atmosfärstryck. Beräkna den totala ändringen i specifik entropi under processen och skissera hela processen i ett  $T$ - $s$ -diagram. Se till exempel tabellen på sida 101 i TEFYMA (Ingelstam m fl, 1977).
2. Luft strömmar in i en konvergent-divergent dysa vid 280 K och 5,0 MPa. Den strömmar ut vid 290 K och 5,0 MPa. Strömningen är adiabatisk men inte reversibel. Beräkna den specifika entropiproduktionen,  $\dot{\sigma}/\dot{m}$ , i strömningen från inloppet till utloppet. Antag att luften beter sig som en ideal gas med konstanta specifika värmekapaciteter med  $c_p/c_v = \frac{7}{5} = 1,40$ .
3. 1,0 kg vatten (H<sub>2</sub>O) förångas reversibelt och isobart vid 9,593 kPa och 45 °C i en sluten behållare med varierbar volym. Uppskatta ändringen i den sammanlagda entropin hos vätskan med ångan då (mass-) andelen ånga ökar från 40% till 60%. Vid 9,593 kPa och 45 °C kan vätskan vatten modelleras som inkompressibel materie med masstäthet 990,2 kg/m<sup>3</sup> och värmekapacitet 4,176 kJ/(kg · K). Vid samma tryck och temperatur kan vattenånga modelleras som en ideal gas med molmassa 18,02 kg/kmol och kvoten  $c_p/c_v = 1,332$ . Ångbildningsentalpin är 2394,8 kJ/kg. Uppgiftstexten innehåller en del information som är helt överflödig.
4. Inför den isoterma kompressionen i en Stirling kretsprocess har arbetsmediet, en sluten mängd luft, temperatur 25 °C och tryck 100 kPa. Luften komprimeras från 6,0 liter till 1,0 liter och det tillförda värmets under den efterföljande isokora uppvärmningen är 800 kJ/kg. Beräkna ändringen i luftens (extensiva) entropi från början av kompressionen till slutet av uppvärmningen. Antag att luften beter sig som en ideal gas med konstanta specifika värmekapaciteter med  $c_p/c_v = \frac{7}{5} = 1,40$  under processerna.
5. En mängd luft vid 600 kPa och 294 K är från början instängd i en volym 0,50 liter. Först expanderas luften kvasistatiskt och isobart tills volymen har fördubblats,  $V_2 = 2V_1$ . Sedan halveras trycket i luften kvasistatiskt och isokort,  $p_3 = \frac{1}{2}p_2$ . Beräkna den totala

ändringen i luftens entropi,  $S_3 - S_1$ . Antag att luften beter sig som en ideal gas med konstanta specifika värmekapaciteter med  $c_p/c_v = \frac{7}{5} = 1,40$ .

6. Vattenånga strömmar in i en lågtrycksturbin i kärnkraftsverket Forsmark 3 vid 770 kPa och 259 °C och strömmar ut vid 3,4 kPa och 26 °C. I detta område på  $p$ - $v$ - $T$ -ytan uppfyller vattenånga den ideala gaslagen med en noggrannhet som är ungefär 1%. Beräkna ändringen i specifik entropi i vattenångan i turbinen. Vad beror denna ändring på? Antag att de specifika värmekapaciteterna är konstanta med  $c_p/c_v = \frac{8}{6} = 1,333$ .  $\mathcal{M} = 18,02$  kg/kmol.

7. En mängd luft vid 700 kPa och 20 °C innesluts i en volym 2,0 dl i en cylinder av en rörlig kolv. Luftmängden tillåts expandera reversibelt till volymen 1,00 liter i en process under vilken trycket,  $p$ , i luften relateras till luftmängdens volym,  $V$ , genom att  $pV^{1,20}$  hålls konstant. Beräkna ändringen i entropin hos luftmängden under processen. Antag att luften beter sig som en ideal gas med konstanta specifika värmekapaciteter under expansionen. Antag vidare att värden hos dessa värmekapaciteter ges av teorin för ideala gaser bestående av tvåatomiga molekyler.

8. En stor tank innehåller tryckluft vid 450 kPa och med samma temperatur, 17 °C, som omgivningen. En ventil till tanken är inte ordentligt stängd och tryckluft puser ur tanken och ut till omgivningen där luften befinner sig vid 101 kPa och 17 °C. Luftens viskositet påverkar strömningen genom ventilen. Betrakta den specifika entropin hos den luft som läcker ur tanken. Vilken eller vilka av de följande påståendena är korrekta, d v s sanna?

- a) Den specifika entropin är konstant eftersom strömningen är kompressibel.
- b) Det går att beräkna ändringen i den specifika entropin eftersom entropi är en tillståndsfunktion.
- c) Det går inte att beräkna ändringen i den specifika entropin eftersom processen är inte reversibel.
- d) Det går att beräkna ändringen i den specifika entropin eftersom luft beter sig som en ideal gas under dessa förhållanden.
- e) Den specifika entropin är konstant eftersom processen är isoterm och adiabatisk.

Ge en kortfattad motivering till din behandling av varje påstående.

9. 2,0 g  $N_2$  komprimeras isotermt från 6,0 liter till 4,0 liter. Beräkna entropiändringen. Antag att  $N_2$  beter sig som en ideal gas med konstanta specifika värmekapaciteter med  $c_v = 742$  J/(kg · K) och  $k = 1,40$  under kompressionen.

10. Majken tappar upp 200 liter vatten vid 50 °C i sitt badkar. Då ringer Gerda och Majken glömmer bort sitt bad som svalnar ned till 20 °C. Beräkna den ändring i badvattnets entropi som denna försmak av kaos har gett upphov till. Omgivningen, d v s badrummet i övrigt förutom själva badkaret, befinner sig vid 101 kPa och 20 °C.

## 9 Stötvågor.

### 9.1 Inlärningsövningar

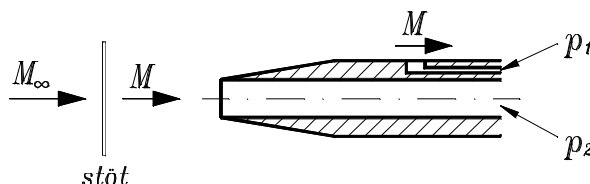
Se även inlärningsövningarna inom avs 5.

1. Luft vid 20 °C och 101 kPa strömmar in i en stillstående stötvåg med hastigheten 412 m/s. Beräkna machtalet i luften nedströms stötvågen.
2. Luft vid 20 °C och 101 kPa strömmar in i en stillstående stötvåg med hastigheten 412 m/s. Kommer temperaturen att öka eller minska då luften passerar genom stötvågen?
3. Luft vid 20 °C och 101 kPa strömmar in i en stillstående stötvåg med hastigheten 412 m/s. Beräkna stagnationstemperaturen i luften nedströms stötvågen.

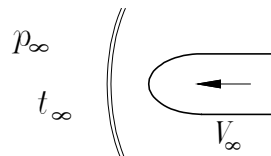
### 9.2 Större uppgifter

Strömningshastigheten betecknas med  $u$ , och inte  $v$ , i några av figurerna.

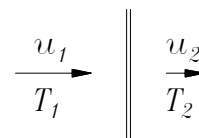
1. I det prandtlrör (eng. pitot-static tube) som visas i figuren har man mätt upp trycken  $p_1 = 152$  kPa och  $p_2 = 242$  kPa. Beräkna machtalet  $M_\infty$  i den anströmmande luften framför stöten. Prandtlröret är konstruerat så att machtalerna  $M$  i figuren är lika.



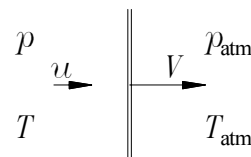
2. En rotationssymmetrisk projektil rör sig med hastigheten  $V_\infty$  in i stillastående luft med trycket  $p_\infty$  och temperaturen  $t_\infty$ . Då projektilens hastighet  $V_\infty$  är större än ljudhastigheten i den stillastående luften uppkommer en fränliggande stöt framför projektilen enligt figuren. Hur stort är trycket i stagnationspunkten på projektilen? Stagnationsströmlinjen förutsätts dels sammanfalla med projektilens symmetriaxel och dels passera ortogonalt genom stöten. Givet:  $V_\infty = 352$  m/s,  $p_\infty = 90$  kPa och  $t_\infty = 8$  °C.



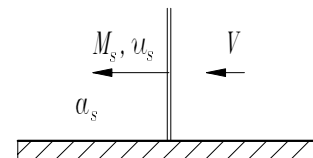
3. I en homogen parallellström av luft är hastigheten  $v_1$  och temperaturen  $T_1$ . I denna luftström finns en rak stöt enligt figuren. Hur stor är temperaturen  $T_2$  på stötens utloppssida? Givet:  $v_1 = 410$  m/s och  $T_1 = 250$  K.



4. En rak stöt rör sig med hastigheten  $V$  in i stillastående luft som har trycket  $p_{atm}$  och temperaturen  $T_{atm}$ . Hur stort är trycket  $p$  och temperaturen  $T$  efter att stöten har passerat? Givet:  $p_{atm} = 100$  kPa,  $T_{atm} = 288$  K och  $V = 610$  m/s.



5. Den första (och hitills enda?) bil som kört med överljuds fart uppges ha haft hastigheten  $v_s = 341,107$  m/s. Därvid bildas en stöt som rör sig med samma hastighet in i den stillastående luften framför bilen. Denna stöt kan antas vara rak (dvs. stötens yta är plan och ortogonal mot rörelseriktningen).



- Då stöten har passerat rör sig luften efter denna i samma riktning med hastigheten  $V$ . Bestäm  $V$  om man samtidigt uppges att det s.k. stötmachtalet  $M_s = v_s/a_s = 1,017$  där  $a_s$  är ljudhastigheten i luften framför stöten. (Uppgifterna kommer från *Scientific American* Dec. 1997.)
6. En plan stötvåg fortplantar sig med hastighet 500 m/s in i luft vid 101 kPa och 12 °C. Beräkna ändringen i specifik entalpi hos luften då den passerar stötvågen. Var noga med att ange huruvida entalpin ökar eller minskar.
7. En plan stötvåg fortplantar sig med hastighet 500 m/s in i luft vid 101 kPa och 2 °C. Beräkna ändringen i specifik inre energi hos luften då den passerar stötvågen. Var noga med att ange huruvida den inre energin ökar eller minskar.

## 10 Exergi.

1. I Clas Ohlsons katalog (2004/05) kan man läsa om ‘Kompressor Corsair 312M’ som är konstruerad för att förse verkstadsmaskiner med tryckluft.

Professionell kolvkompressor med 25 l tank. Direktdrivande motor 230 V/-2200 W. Max. arbetstryck 10 bar. Genomlupen cylindervolym 284 l/min, fri avgiven luftmängd vid 6 bar 185 l/min. Vikt 38 kg.

Uppskatta flödes- eller strömningsexergin,  $a_f$ , hos luften i tanken då den befinner sig vid 8 bar = 800 kPa och med försumbar rörelseenergi. Antag att luften beter sig som en ideal gas med konstanta specifika värmekapaciteter med  $c_p/c_v = \frac{7}{5} = 1,40$ .

2. Några ingenjörer håller på att konstruera en liten miljövänlig stadsbil. Bilen ska drivas av tryckluft som lagras vid 20 MPa i en tank med volym 150 liter. Tanken måste vara stark och är inte nämnvärt termiskt isolerad. Bilens totala fartmotstånd, d v s rullmotståndet plus luftmotståndet eller *drag*, ska vara lågt. Om fartmotståndet är 120 N vid 50 km/h hur långt kommer bilen maximalt att kunna köras i denna fart på en ‘tankning’, teoretiskt sett, en dag då temperaturen är 10 °C? Antag att tryckluften uppför sig som en ideal gas med konstanta specifika värmekapaciteter med  $c_p/c_v = \frac{7}{5}$ .
3. En mängd atmosfärluft vid 18 °C och 101 kPa stängs in i 800 cm<sup>3</sup> i en cylinder av en fritt rörlig kolv. Luften komprimeras kvasistatiskt och isotermt, d v s relativt långsamt, tills trycket är 600 kPa. Beräkna ändringen i exergi hos luften relativt ett dött tillstånd vid atmosfärförhållanden, 18 °C och 101 kPa. Antag att luften beter sig som en ideal gas med konstanta specifika värmekapaciteter med  $c_p/c_v = \frac{7}{5} = 1,40$ .
4. Majken tappar upp 200 liter vatten vid 50 °C i sitt badkar. Badvattnets tyngdpunkt ligger 35 cm ovanför badrumsgolvet medan upptappningen har skapat turbulens i vattnet med strömningshastigheter av storleksordning 1 cm/s. Beräkna exergin i badvattnet. Omgivningen, d v s badrummet i övrigt förutom själva badkaret, befinner sig vid 101 kPa och 20 °C. Använd badrumsgolvet som referensnivå.
5. Kärnkraftsverken Forsmark 1 och Forsmark 2 levererar tillsammans 1 900 MW till elnätet i Sverige samtidigt som 5 400 MW ‘spillvärme’ överförs med kylvattnet till den s k Biotestsjön i Öregrund (helt i överensstämmelse med termodynamikens andra huvudsats). Betrakta vattnet i sjön som ett värmemagasin och uppskatta det bidrag som spillvärmets ger till dess exergibudget. Beräkna exergin relativt ett dött tillstånd vid 100 kPa och 4 °C och utgå ifrån att värmeöverföringen höjer vattnets temperatur till 12 °C. Antag dessutom att värmeöverföringen är internt reversibel samt att de relevanta egenskaperna hos det bräckta vattnet i sjön överensstämmer med rent vatten till åtminstone en siffras noggrannhet.
6. Mia får en värmemotor med tillhörande värmeväxlare i julklapp från morbror Massoud. Vilken överraskning! Men vad spännande! Hon fyller en termoskanna med 4,5 dl varmt kranvatten vid 45 °C och börjar köra motorn med vattnet som varmt värmemagasin

och inomhusluften som kallt värmemagasin. Uppskatta den maximala mängd arbete som hon kommer att kunna få motorn att utföra.

7. Under vissa driftsförhållanden alstrar en viss jetmotor, d v s reaktionsmotor, en luftstråle vid 80 kPa och 325 °C och med strömningshastigheten 930 m/s relativt motorn. Beräkna flödes- eller strömningsexergin,  $a_f$ , i luftstrålen i motorns vilorum och relativt en omgivning där temperaturen är  $-30\text{ °C}$  och trycket 80 kPa. Inslaget av avgaser d v s förbränningsprodukter i strålen kan försummas. Antag att luft beter sig som en ideal gas med konstanta specifika värmekapaciteter under de aktuella förhållandena och använd teoretiska värden för dessa värmekapaciteter.

8. I Norrland kan snö samlas i hög under vintern för att kunna utgöra ett kallt värmemagasin i en kyl- och ventilationsprocess för stora sjukhus, kontorsbyggnader m m under sommaren. Betrakta en hög med 1 000 kg snö, d v s fruset vatten, vid 0 °C och antag att den smälter homogent och kvasistatiskt till vätskan vatten vid atmosfärstryck. Vilken ändring i värmemagasinet (extensiva) exergi skulle denna värmeförsörjning och fasomvandling medföra? Beräkna exergin relativt ett dött tillstånd vid 100 kPa och 20 °C.

9. En mängd kväve ( $\text{N}_2$ ) befinner sig vid 6,2 MPa och 527 °C, och med en hastighet 290 m/s relativt det döda tillståndets referensram. Beräkna;

a) den specifika exergin,  $a$ , och

b) strömningsexergin,  $a_f$ ,

relativt ett dött tillstånd där  $T_0 = 298\text{ K}$  och  $p_0 = 100\text{ kPa}$ . Bortse från tyngdkraftens potentiella energi.  $\mathcal{M} = 28,01\text{ kg/kmol}$ .

10. Vatten vid 25 °C och 100 kPa leds från en sjö i bergen (i Nordamerika) vid en höjd 1 000 m ovanför dalbotten och in i en vattenturbin i dalen. För stationära driftsförhållanden uppskatta det minsta massflöde som krävs för att producera el med en effekt 1,0 MW. Låt  $T_0 = 298\text{ K}$  och  $p_0 = 100\text{ kPa}$ .

11. Luft strömmar in i en välisolerad turbin vid 500 kPa och 400 K, och med en hastighet 150 m/s. Den strömmar ut vid 100 kPa och 300 K, och med en hastighet 70 m/s. Inverkan av tyngdkraften kan försummas.

a) Beräkna det axelarbete,  $w_{\text{axel}}$ , som turbinen utför per kg luft.

b) Beräkna det teoretiskt sett maximala axearbete som kan utvecklas mellan samma inlopps- och utloppsflöden i en omgivning där  $T_0 = 300\text{ K}$  och  $p_0 = 100\text{ kPa}$ . Antag att all eventuell värmeöverföring till den optimala apparaten sker vid just  $T_0$ .

Jämför resultaten från del a och del b.



# A Facit

## 1 Den första huvudsatsen och $p$ - $V$ -arbete.

### 1.1 Inlärningsövningar

1.  $W = 60 \text{ kJ}$ ,  $Q = -5 \text{ kJ}$ ,  $\Delta U = -65 \text{ kJ}$ .
2.  $w = W/m = 600 \text{ kJ/kg}$ ,  $q = Q/m = -50 \text{ kJ/kg}$ ,  $\Delta u = -650 \text{ kJ/kg}$ .
3.  $Q = W = -50 \text{ kJ}$ .
4. motorn;  $\Delta U = 0$ ,  $Q = Q_{\text{in}} - Q_{\text{ut}} \rightarrow Q_{\text{ut}} = 25 \text{ MJ}$ .  
bilen inkl bränsletanken;  $Q = \Delta U + W = -25 \text{ MJ}$ .

### 1.2 Större uppgifter.

1. Rita ett  $p$ - $V$ -diagram. Observera att begynnelse- och sluttillstånden är de samma för båda processer.  $W_A = Q_A - m_A \Delta u = 30,0 \text{ kJ}$ .
2. Rita ett  $p$ - $V$ -diagram.  $W_B = Q_B - m_B \Delta u = 95 \text{ J}$ .
3. Rita ett  $p$ - $V$ -diagram.  $Q = \Delta U + W = 213 \text{ kJ}$ .
4. Rita ett  $p$ - $V$ -diagram.  $Q = \Delta U + W = -1,6 \text{ kJ}$ .
5. Rita ett  $p$ - $V$ -diagram.  $\Delta U = Q - W = 98,2 \text{ kJ}$ .

## 2 Ideala gaser.

### 2.1 Inlärningsövningar

1.  $R = \bar{R}/\mathcal{M} = 296,8 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ .
2.  $R = \bar{R}/\mathcal{M} = 259,8 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ .
3.  $v = RT/p = 0,833 \text{ m}^3/\text{kg}$ .
4.  $c_v = R/(k - 1) = 2,5\bar{R}/\mathcal{M} = 742,0 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ .
5.  $c_v = R/(k - 1) = 3,0\bar{R}/\mathcal{M} = 566,7 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ .
6.  $\Delta u = c_v \Delta T = 215 \text{ kJ/kg}$ .

## 2.2 Joules lag.

1.  $T_3 = T_1 \rightarrow U_3 = U_1$ .
2.  $p - p_{\text{atm}} = 47 \text{ kPa}$ .
3. Processen är isoterm.  $p_3 = (p_1V_1 + p_2V_2)/V_3 = 300 \text{ kPa}$  och  $Q = \Delta U + W = 0 \text{ J}$ .

## 2.3 Isotherma processer.

1. Rita ett  $p$ - $V$ -diagramm.  $Q = W = -144 \text{ J}$ .
2. Rita ett  $p$ - $V$ -diagramm.  $Q_{23} = W = 5,08 \text{ kJ}$ .
3. Rita ett  $p$ - $V$ -diagramm.  $Q = W = -160 \text{ J}$ .

## 2.4 Polytropa processer och adiabatiska processer.

1.  $Q_{\text{ut}} = |Q_{23}| = mc_v(T_2 - T_{13}) = 55 \text{ MJ}$ .
2. Rita ett  $p$ - $V$ -diagramm.  $Q = \Delta U + W = 96 \text{ J}$ .
3. Rita ett  $p$ - $V$ -diagramm.
  - a)  $p_3 = (V_2/V_3)^k = 250 \text{ kPa}$ .
  - b)  $W_{13} = W_{12} + W_{23} = 4,6 \text{ kJ} + 13,5 \text{ kJ} = 18,1 \text{ kJ}$ .

## 2.5 Diverse.

1. Rita ett  $p$ - $V$ -diagramm och modellera processen. Numeriska resultat bör ha storleksordningen 3 till 10 kJ.

## 3 Vätskor och gaser.

### 3.1 Inlärningsövningar — vätskor.

1.  $Q = mc_v\Delta T = 42 \text{ kJ}$
2.  $\Delta u = c_v\Delta T = 42 \text{ kJ/kg}$ .
3.  $\Delta u = 0$ .

### 3.2 Större uppgifter — fasomvandling och verkliga gaser.

1.  $\frac{v_g - v_f}{v_g} \frac{\dot{Q}}{h_{fg}}$ .
2.  $\Delta V = 3,1 \text{ m}^3$ , en ökning i volym.
3.  $Q = +11,4 \text{ kJ}$ .
4. a) Ja, m h a gaslagen.  
b) Det är inte omöjligt men Joules lag kan inte användas.  
c) Ja,  $p$ - $V$ -arbetet kan beräknas som vanligt.  
d) Man kan eventuellt använda energibudgeten,  $\Delta U = Q - W$ , men man får inte anta att processen är isoterm och därmed adiabatisk.
5.  $\Delta V = 0,86m(v_g - v_f) = 260 \text{ cm}^3$ .

## 4 Strömning genom öppna system.

### 4.1 Inlärningsövningar

1.  $\rho = p/RT = 1,20 \text{ kg/m}^3$ .
2.  $c_p = kR/(k - 1) = 3,5\bar{R}/\mathcal{M} = 1039 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$ .
3.  $c_p = kR/(k - 1) = 4,0\bar{R}/\mathcal{M} = 755,6 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$ .
4.  $\Delta h = c_p\Delta T = 301 \text{ kJ/kg}$ .
5.  $\Delta h = c_v\Delta T + 0 = 42 \text{ kJ/kg}$ .
6.  $\Delta h = 0 + \Delta p/\rho = 420 \text{ J/kg}$ .
7.  $\Delta \left( h + \frac{1}{2}v^2 \right) = 0 \rightarrow h_0 + 0 = h + \frac{1}{2}v^2 \rightarrow T_0 = T + \frac{1}{2}v^2/c_p = 325 \text{ K}$ .

### 4.2 Gasturbiner m m.

1.  $w_{\text{axel}} = -\Delta h = 430 \text{ kJ/kg}$ .
2.  $w_{\text{axel}} = 670 \text{ kJ/kg}$ .
3.  $c_p = w_{\text{axel}}/(T_{\text{in}} - T_{\text{ut}}) = 1160 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$ .
4.  $w_{\text{axel}} = 420 \text{ kJ/kg}$ .
5.  $\dot{W}_{\text{kompr}} = -\dot{m}w_{\text{axel}} = 2,7 \text{ kW}$ .
6.  $\dot{m} = \dot{W}_{\text{axel}}/w_{\text{axel}} = 8,1 \text{ kg/s}$ .

### 4.3 Vattenkraft m m.

1.  $w_{\text{optml}} = -g\Delta z = 735 \text{ J/kg}$ .
2.  $(\dot{W}_{\text{optml}} - \dot{W}_{\text{el}})/\dot{W}_{\text{optml}} = 0,20$ .
3.  $\dot{W}_{\text{pump}} = -\dot{W}_{\text{axel}} = -\dot{m} w_{\text{axel}} = 550 \text{ W}$ .
4.  $|\Delta z| = 2,0 \text{ m}$ .

## 5 Kompressibel strömning.

### 5.1 Inlärningsövningar

1.  $a = \sqrt{\gamma RT} = 343 \text{ m/s}$ .
2.  $M = v/a = 0,087$ .
3.  $M = 380/319 = 1,19$ .
4.  $M = 1,19 \rightarrow p/p_0 = 0,41778 \rightarrow p_0 = 120 \text{ kPa}$ , enligt tabeller.  
Alternativt  $p_0 = p[1 + \frac{1}{2}(\gamma - 1)M^2]^{\gamma/(\gamma-1)} = 120 \text{ kPa}$ .
5.  $T_0 = T[1 + \frac{1}{2}(\gamma - 1)M^2] = 325 \text{ K}$ .  
Alternativt  $M = 1,19 \rightarrow T/T_0 = 0,77929 \rightarrow T_0 = 325 \text{ K}$ , enligt tabeller.

### 5.2 Adiabatisk och reversibel strömning.

1.  $v = Ma = 0,8864 \cdot 331,29 \text{ m/s} = 293,65 \text{ m/s}$
2.  $v = Ma = 0,78366 \cdot 433,73 \text{ m/s} = 339,9 \text{ m/s}$
3.  $M_\infty = 0,44 \rightarrow T_0 = 304 \text{ K}$ , *i.e.*  $31,2^\circ\text{C}$ .
4.  $T_0/T = 6,0 \rightarrow M = 5,0$ .

### 5.3 Dysströmning.

1.  $M = 1,54 \rightarrow A = 12 \text{ cm}^2$ .
2.  $p_1/p_0 = 0,843 \rightarrow M_2 = 1,28$
3.  $M = 5,79 \rightarrow A^* = 13,9 \text{ mm}^2$
4.  $u_0 - u_1 = c_v (T_0 - T_1) = 629,7 \cdot (321 - 240) \text{ J/kg} = 54,8 \text{ kJ/kg}$ ,  
d v s den specifika inre energin minskar då entalpi omvandlas till rörelseenergi.

5.  $M_2 = 1,7024 \rightarrow T_2 = 299 \text{ K}$
6.  $v = Ma = 1,05 \cdot 314 \text{ m/s} = 329 \text{ m/s}$ .
7.  $V_e = M_e a_e = 2,880 \cdot 971,9 \text{ m/s} = 2799 \text{ m/s}$ .  
Alt.  $V_e = 2\sqrt{h_0 - h_e}$ .
8. a)  $p_{\text{ut}} < p^*$ .  
b)  $A^* = 11,5 \text{ cm}^2$ .
9. Ströpt dysströmning  $\rightarrow M_1 = 0,5034$  och  $\dot{m}_{\text{max}} = 0,51 \text{ kg/s}$

## 6 Den andra huvudsatsen.

### 6.1 Inlärningsövningar.

1.  $\eta = W/Q_{\text{in}} = 0,26$ .
2.  $\eta_{\text{rev}} = 1 - 300/3000 = 0,9$ .
3.  $\max W = \eta_{\text{rev}} Q_{\text{in}} = 31 \text{ MJ}$ .

### 6.2 Motorer m m.

1. a)  $Q_{\text{ut}} = 2,1 \text{ kJ/cykel}$ .  
b) en övre gräns.  
c)  $\eta = 0,45 < \eta_{\text{max}} \approx 0,85 \pm 0,05$ .
2. a)  $\dot{Q}_{\text{in}} \geq 7300 \text{ MW}$ .  
b)  $\eta \leq 0,50$ .  
c)  $\eta = 0,26$ , vilket stämmer mycket bra med både termodynamikens andra huvudsats och siffror som redovisas på webbplatsen <http://www.forsmark.com>.
3. a) Enligt termodynamikens andra huvudsats kan enbart en del av detta värme omvandlas till arbete.  
b)  $W < \max \eta_{\text{rev}} Q_{\text{in}} = 3,7 \text{ kJ}$ .
4.  $\eta < 0,1$ . Det kan vara mer lämpligt att använda solfångarna för att förvärma varmt vatten till badrummet och köket. För att utnyttja temperaturen  $6000 \text{ K}$  hos solens värmestrålning ska man använda en solcell som omvandlar ljuset direkt till el.

### 6.3 Kylprocesser och värmepumpar.

1.  $\dot{Q}_{\text{kall}} < 270 \text{ W}$ .
2. Den påstådda prestandan hos jordvärmesystemet är klart möjlig enligt den andra huvudsatsen.
3. Med bl a  $\beta \simeq \frac{1}{3}\beta_{\text{rev}}$  fås  $\dot{W}_{\text{in}} \approx 10 \text{ W}$ .

## 7 Kretsprocesser.

### 7.1 Inlärningsövningar.

1. Carnotkretsprocessen. (Stirlingkretsprocessen behöver ett tillägg i formen av en sk regenerator.)
2. En kylprocess eller en värmepump.
3.  $W_{\text{netto}} (= Q_{\text{netto}})$ .

### 7.2 Kretsprocessanalyser.

1. b)  $T_2 = 950 \text{ K}$  och  $p_{23} = 8,06 \text{ MPa}$ .  
c)  $Q_{\text{ut}} = |Q_{41}| = 2,16 \text{ kJ}$ .  
d)  $W_{\text{netto}} = 3,16 \text{ kJ}$ .  
e)  $\eta = 0,59$ .  
f)  $\eta < 1 - T_1/T_3 = 0,89$ .

## 8 Entropi.

### 8.1 Inlärningsövningar.

1.  $\Delta S = Q/T = 2,0 \text{ kJ/K}$ .
2.  $\Delta S = Q/T = W/T = 1,0 \text{ J/K}$ .
3.  $\Delta T = 0 \rightarrow \Delta U = 0 \rightarrow Q = 0 \rightarrow \Delta S = 0$ .

### 8.2 Större uppgifter.

1.  $\Delta s = 1,22 + 1,31 + 6,06 = 8,59 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
2.  $\dot{\sigma}/\dot{m} = 35 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K}) > 0$
3.  $\Delta S = Q/T = 1,51 \text{ kJ/K}$
4.  $\Delta S = 4,23 \text{ J/K} > 0$

5.  $S_3 - S_1 = 0,71 \text{ J/K}$

6.  $\Delta s = 1,45 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$

7.  $\Delta S = 0,38 \text{ J/K}$

8. Falskt, Korrekt, Falskt, Korrekt, Falskt

9.  $\Delta S = -0,24 \text{ J/K}$

10.  $\Delta S = -81,3 \text{ kJ/K}$

## 9 Stötvågor.

### 9.1 Inlärningsövningar

1.  $M_1 = v_1/a_1 = v_1/\sqrt{\gamma RT_1} = 1,20 \rightarrow M_2 = 0,842$ , enligt tabeller.

2.  $M_1 > 1$  med  $M_2 < 1 \rightarrow$  rörelseenergin minskar  $\rightarrow$  entalpin ökar  $\rightarrow$  temperaturen ökar.

3.  $T_{0,2} = T_{0,1} = T_1 + \frac{1}{2}v_1^2/c_p = 377 \text{ K}$ .  
Alternativt beräknas  $T_{0,1}$  m h a tabeller enl avs 5.

### 9.2 Större uppgifter

1.  $M = 0,8429 \rightarrow M_\infty = 1,199$

2.  $M_\infty = 1,047 \rightarrow p_0 = 180 \text{ kPa}$ . Obs!  $p_0 \neq p_{0,\infty}$ .

3.  $M_1 = 1,294 \rightarrow T_2 = 297 \text{ K}$

4. Byt referensram.  $M_1 = 1,793 \rightarrow p = 358 \text{ kPa}$  och  $T = 440 \text{ K}$ .

5. Byt referensram.  $v_s - V = M_2 a_2 = 332 \text{ m/s} \rightarrow V = 9,4 \text{ m/s}$ .

6.  $M_1 = 1,48 \rightarrow \Delta h = c_p(T_2 - T_1) = 87 \text{ kJ/kg}$ , d v s entalpin ökar.

7.  $M_1 = 1,50 \rightarrow \Delta u = c_v(T_2 - T_1) = 64 \text{ kJ/kg}$ , d v s den inre energin ökar.

## 10 Exergi.

1.  $a_f = -T_0(s - s_0) = 175 \text{ kJ/kg}$

2.  $x_{\max} = W_{\max}/F = A/F = 107 \text{ km}$

3.  $\Delta A = A_2 = 76,8 \text{ J}$

4.  $A = (U - U_0) - T_0(S - S_0) = 1,2 \text{ MJ}$

5. Du behöver generalisera ekvationer och formler till effekter under stationära förhållanden. Börja med att ta fram ett uttryck för  $dA$  från en av grundformlerna för  $A$  eller  $\Delta A$ . Tag sedan fram ett uttryck för  $\dot{A} = \frac{dA}{dt}$  och identifiera bidraget till  $\dot{A}$  från spillvärmets.

$$\dot{A}_{\text{spill}} = (1 - T_0/T_{\text{sjö}})\dot{Q}_{\text{spill}} = 150 \text{ MW}$$

6.  $\max W = A = 1,90 \text{ kJ}$

7.  $a_f = h - h_0 + \frac{1}{2}v^2 - T_0(s - s_0) = 569 \text{ kJ/kg}$

8.  $\Delta A = (1 - T_0/T)Q = -24 \text{ MJ}$

9. a)  $a = 389 \text{ kJ/kg}$ , och

b)  $a_f = 623 \text{ kJ/kg}$ .

10.  $\min \dot{m} = \dot{W}_{\text{axel}}/\max w_{\text{axel}} = \dot{W}_{\text{axel}}/a_f = 102 \text{ kg/s}$ .

11. a)  $w_{\text{axel}} = 100 + 8,8 = 109 \text{ kJ/kg}$ .

b)  $\max w_{\text{axel}} = a_{f,\text{in}} - a_{f,\text{ut}} = 162 - 2,5 = 160 \text{ kJ/kg}$ .