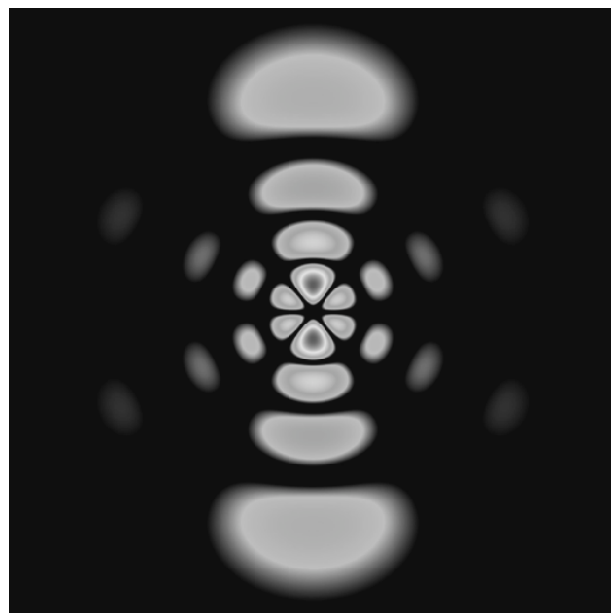


Der Karlsruher Physikkurs

Värmelära



Universität Karlsruhe

Friedrich Herrmann och Georg Job

Utdrag ur
Der Karlsruher Physikkurs
Värmelära

December 2008

I samarbete med Karen Haas, Dr. Matthias Laukenmann, Dr. Lorenzo
Mingirulli, Dr. Petra Morawietz, Dr. Peter Schmälzle

Illustrationer: F. Herrmann

Översättning till svenska: Rainald Schröder

Innehåll

10. Entropie och entropiströmmar	5
10.1 Entropie och temperatur.....	5
10.2 Temperaturskillnaden som drivkraft för en entropiström.....	6
10.3 Värmepumpen.....	8
10.4 Den absoluta temperaturen.....	9
10.5 Entropialstring.....	10
10.6 Entropiströmstyrkan.....	12
10.7 Värmemotståndet.....	13
10.8 Entropitransport genom konvektion.....	15
11. Entropi och energi	17
11.1 Entropin som energibärare.....	17
11.2 Sambandet mellan energiström och entropiström.....	18
11.3 Entropialstring genom entropiströmmar.....	20
11.4 Värmemotorer.....	21
11.5 Entropikällor för värmemotorer.....	23
11.6 Energiförlust och verkningsgrad.....	24
11.7 Sambandet mellan entropiinhåll och temperatur.....	26
11.8 Sambandet mellan energitillförsel och temperaturändring.....	26
12. Fasövergångar	29
12.1 Fasövergångar.....	29
12.2 Ångbildning och avdunstning.....	30
12.3 Fasövergångar i natur och teknik.....	31
12.4 Sambandet mellan energitillförseln och entropin vid fasövergångar.....	32
13. Gaser	35
13.1 Gaser och kondenserade ämnen.....	35
13.2 Gasernas termiska egenskaper.....	36
13.3 Värmemotorers funktionssätt.....	38
13.4 Varför kyls luften över jordytan ner ju högre upp man kommer?.....	40
13.5 Den termiska konvektionen.....	41
14. Ljus	43
14.1 Entropitransport i vakuum.....	43
14.2 Olika sorters ljus.....	43
14.3 Entropi- och energitransport med ljus.....	44
14.4 Ljusets temperatur.....	45
14.5 Jordens entropi- och energibalans.....	45
14.6 Växthuseffekten.....	46

Värmelära

Utdrag ur "Karlsruher Physikkurs"

10. Entropi och entropiströmmar

Fysikens andra stora delområde är värmeläran. Namnet antyder vad det handlar om: att undersöka fenomen som hänger ihop med ett föremål uppvärmning och kylning.

Livet på jorden är bara möjligt tack vare en gigantisk värmeström som kommer från solen. Jordens klimat och väder bestäms i huvudsak av termiska processer. (Ordet "termisk" betyder "som har med värmeförhållanden att göra".)

Många maskiner fungerar utifrån värmelärens lagar: bilmotorn, ångturbinen i kraftverk, kylskåpets värmepump.

Värmeförlusterna i ett hus och värmetillförseln genom värmeanläggningen kan beskrivas kvantitativt med hjälp av värmeläran.

Man får inte heller glömma den viktiga roll som värmen har vid kemiska reaktioner.

10.1 Entropi och temperatur

För att behandla värmeläran utgår man från två storheter, som beskriver en kropps värmetillstånd.

Den ena storheten är den redan kända temperaturen. Den betecknas ofta med den grekiska bokstaven ϑ (theta) och mäts i enheten $^{\circ}\text{C}$ (grader Celsius).

Den andra storheten är också känd från vardagslivet, men under ett annat namn än det som normalt används inom fysiken. Den kallas "värmemängd" eller "värme" i dagligt tal. För att förklara skillnaden mellan värmemängd och temperatur gör vi ett enkelt experiment, se figur 10.1. En bägare A innehåller 1 liter vatten med temperaturen 80°C . Hälften av vattnet hälls över i en annan tom bägare B. Vad händer med temperaturen och vad händer med värmemäng-

den? Vattnets temperatur i bägare A och i bägare B efter omhällningen är densamma som temperaturen i bägare A innan. Värmemängden däremot har fördelats jämt mellan bägarna A och B. Om A innehöll 10 enheter värme från början så finns efter omhällningen 5 enheter vardera i A och B.

Temperaturen karakteriserar alltså tillståndet att vara varm (eller kall) hos en kropp oberoende av dess storlek. Värmemängden däremot är något som en kropp *innehåller*.

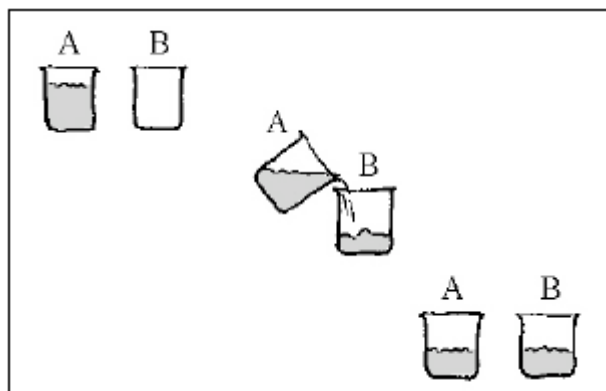


Fig 10.1 Hälften av vattnet i bägare A hälls över i bägare B.

Det vardagliga uttrycket "värmemängd" har fått en speciell beteckning i fysiken. Storheten kallas entropi på fackspråk, dess symbol är S och enheten 1 carnot, förkortad 1 Ct.

Enhetsen är uppkallad efter den franske fysikern Sadi Carnot (1796–1832), som har gjort viktiga bidrag till utvecklingen av entropibegreppet.

För att förtydliga vad som menas med entropi jämför vi de båda vattenbägarna i figur 10.2. Båda innehåller lika mycket vatten. Vattnet i den vänstra bägaren är hett, det har en temperatur av 70°C , medan vattnet i den högra bägaren är kallt med en temperatur av 10°C . Vilken bägare innehåller mer entropi (i dagligt tal: mer värme)? Naturligtvis den vänstra.

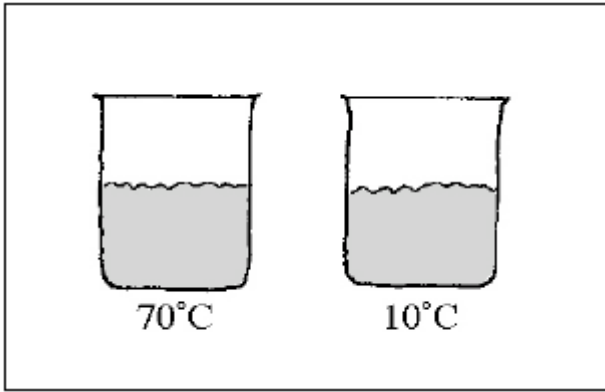


Fig 10.2 Vattnet i vänstra bägaren innehåller mer entropi än vattnet i högra bägaren.

Ju högre temperatur ett föremål har desto större är dess entropi.

Låt oss nu jämföra vattenbägarna i figur 10.3. Här är temperaturerna desamma, men vattnets massa olika i de olika bägarna. Vilken bägare innehåller mer entropi? Återigen den vänstra.

Ju större ett föremåls massa desto större är dess entropi.

I figur 10.4 är det däremot i nuläget omöjligt att avgöra vilken bägare som innehåller mer entropi.

Låt oss återgå till försöket som beskrivs i figur 10.1. Anta att det i bägare A finns en liter vatten med entropin 4000 Ct. Vi häller $\frac{1}{4}$ av vattnet, dvs 250 ml, i den andra, tomma bägaren B. Hur mycket entropi finns efter omhållningen i bägare A, hur mycket i bägare B? Entropin fördelades i samma förhållande som vattnet. Det flyttades alltså 1000 Ct över i bägare B, medan 3000 Ct stannade kvar i bägare A.

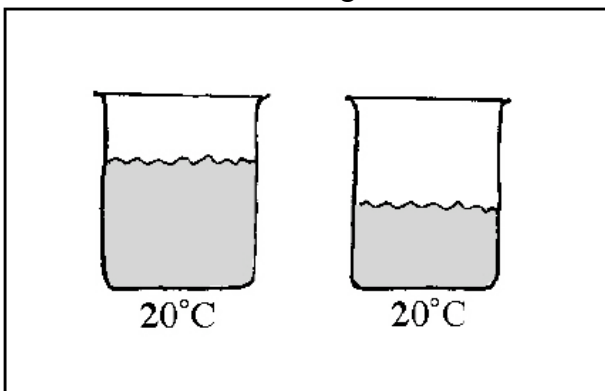


Fig 10.3 Vattnet i vänstra bägaren innehåller mer entropi än vattnet i högra bägaren.

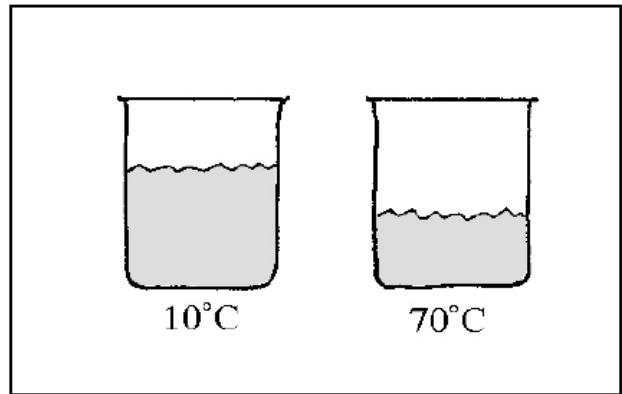


Fig 10.4 Här går det inte att avgöra vilken bägare som innehåller mer entropi.

Hur mycket är då 1 carnot? Det är en ganska behändig enhet: 1 cm³ vatten med temperaturen 25 °C innehåller 3,88 Ct eller om man så vill:

1 cm³ vatten med normaltemperatur innehåller ca 4 Ct.

Uppgifter

- Luften i ett rum A med volymen 75 m³ har en temperatur av 25 °C. Luften i ett annat rum B med volymen 60 m³ har en temperatur av 18 °C. Vilket rum innehåller mer entropi?
- Kaffet i en full kaffekanna innehåller entropin 3900 Ct. Man häller upp kaffet på tre koppar, lika mycket kaffe i varje kopp. Därefter är kannan halvfull. Hur mycket entropi finns nu i kannan respektive i varje kopp?

10.2 Temperaturskillnaden som drivkraft för en entropiström

Vi håller en bägare A med hett vatten i en behållare B med kallt vatten, se figur 10.5. Vattnets temperatur i A kommer då att sjunka, medan vattentemperaturen i B kommer att stiga. Temperaturerna närmar sig varandra och blir till slut lika stora. Men temperaturen i B kommer aldrig att bli större än temperaturen i A.

Förklaringen är att det strömmar entropi från A till B ända tills temperaturskillnaden har jämnats ut.

Man kan upprepa försöket med andra behållare, se figur 10.6a och b. Alltid kommer vattnet i båda behållarna att få samma temperatur. I figur 10.6a ligger sluttemperaturen närmare utgångstemperaturen hos B, medan den i 10.6b ligger närmare utgångstemperaturen hos A.

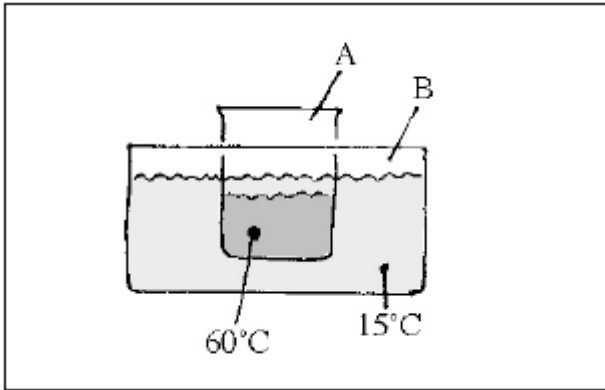


Fig 10.5. Entropi strömmar från den inre behållaren A till den yttre behållaren B

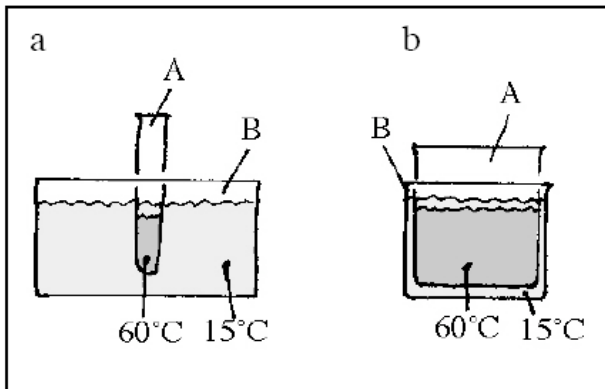


Fig 10.6. I båda fallen strömmar entropi från den inre till den yttre behållaren.

Naturligtvis kan utgångstemperaturen vara högre i behållare B och lägre i behållare A. Även i detta fall kommer temperaturerna att utjämnas. Vi kan dra följande slutsats:

Entropi strömmar alltid av sig själv från områden med högre temperatur till områden med lägre temperatur.

Det är alltså temperaturskillnaden mellan två områden som är orsaken till en entropiström.

En temperaturskillnad är drivkraften för en entropiström.

Därmed är det lätt att förstå att entropin slutar strömma då temperaturerna har jämnats ut. I och med att temperaturskillnaden är noll har drivkraften för entropiströmmen försvunnit.

Tillståndet då temperaturerna har jämnats ut kallas *termisk jämvikt*.

Tänk dig att det står en kopp te framför dig. Teet är för varmt för att drickas. Du väntar alltså tills det har svalnat något. Vad har hänt

under avsvälningen? Eftersom teets temperatur är högre än bordets och den omgivande luftens flödar en entropiström från teet till omgivningen. Om man mäter väldigt noga kan man konstatera att omgivningen blivit varmare, men i praktiken har entropin från teet spridit ut sig så pass mycket att den inte längre kan registreras.

Känn nu på olika föremål i klassrummet. Några känns kallare: metall- eller betongföremål. Andra känns mindre kalla, t ex bänkarnas träskivor. Vissa föremål tycks nästan vara behagligt varma, t ex en handske eller en bit frigolit. Ett järnföremål verkar alltså ha lägre temperatur än ett föremål av trä. Men om det verkligen är sant skulle det strömma entropi från de varmare träföremålen till de kallare järnföremålen tills temperaturskillnaden har jämnats ut. Varför känns de då olika varma?

Innan vi funderar vidare mäter vi föremålens temperatur så att vi inte längre är beroende av känseln. Resultatet visar att alla föremål har samma temperatur, förutsatt att de har funnits i rummet tillräckligt länge så att eventuella temperaturskillnader har jämnats ut.

Vi kan dra slutsatsen att vår känsla för varmt och kallt har lurat oss. Vad som har orsakat denna ”felaktiga” känsla och varför den egentligen inte alls är fel kommer att tas upp i ett av de följande avsnitten.

Uppgifter

1. (a) Vid matlagning strömmar entropi från kokplattan till kastrullen. Varför? (b) Kastrullen ställs på ett grytunderlägg på bordet. Därefter strömmar entropi från kastrullen till underlägget. Varför? (c) En kylskåpskall flaska med läsk ställs på bordet. Bordet blir kallt på det ställe där flaskan står. Varför?

2. En stor metallkloss A har en temperatur på 120 °C, en mindre kloss B av samma metall en temperatur på 10 °C. Klossarna ställs ihop så att entropi kan flöda från den ena till den andra. Åt vilket håll strömmar den? Ligger sluttemperaturen närmare 120 °C eller närmare 10 °C?

3. Framför dig ligger en liten varm metallkloss och en stor kall. (a) Kan du avgöra vilken som innehåller mer entropi? (b) Du låter klossarna komma i kontakt med varandra. Vad händer med temperaturen och entropin? (c) Vilken kloss innehåller mer entropi i slutet?

10.3 Värmepumpen

Att entropin av sig själv alltid strömmar från ett föremål med högre temperatur till ett föremål med lägre temperatur betyder inte att den inte kan flöda åt andra hållet, dvs från kallt mot varmt. Det kan den – men inte av sig själv. För att det skall gå måste man använda en pump för entropin. I dagligt tal kallas denna pump ”värmepump”.

En värmepump finns idag i varje hus. Den ingår i kylskåpet (och i frysen) och har till uppgift att transportera entropi från dess inre till utsidan. Innan vi tittar närmare på hur kylskåpet fungerar studerar vi principen för en värmepump.

Som varje pump har även värmepumpen två anslutningar för det som skall pumpas: en ingång och en utgång. En vattenpump har en ingång och en utgång för vatten, en värmepump en ingång och en utgång för entropi, se figur 10.7. Både ingången och utgången består av den rörspiral, genom vilken det strömmar en vätska eller en gas.

På så sätt transporteras entropi in respektive ut ur pumpen.

En värmepump transporterar entropi från ett område med lägre till ett område med högre temperatur.

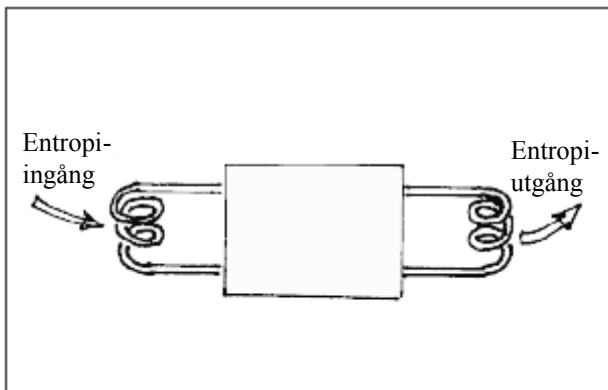


Fig 10.7 Värmepumpen har en ingång och en utgång för entropi

Att kyla ner ett föremål innebär att man bortför entropi från det, att värma upp ett föremål innebär att man tillför entropi till det. Man inser av figur 10.7 att en värmepump kan användas både för kylning och för uppvärmning. Värmepumpar används faktiskt till båda ändamålen.

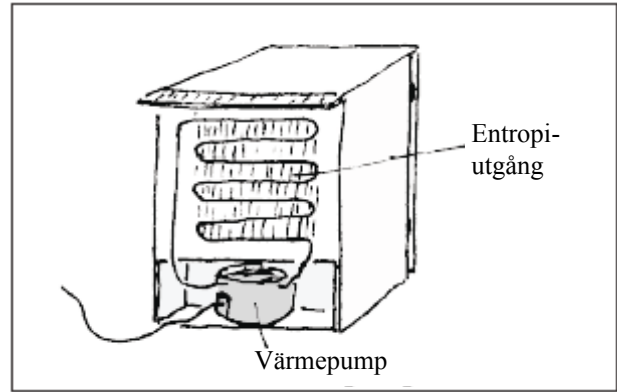


Fig 10.8 Kylskåpet sett bakifrån. Man ser värmepumpen och rören, varifrån entropin förs bort från kylskåpet.

Vi undersöker närmare hur kylskåpet fungerar, se fig 10.8. Själva värmepumpen finns längst ner på kylskåpets baksida. Där finns även entropiutgången, ett rörsystem som utgör större delen av kylskåpets baksida. Att entropin kommer ut ur kylskåpet här märks på att rörsystemet är varmt när kylskåpet är igång. Entropiingången finns inne i kylskåpet: ett liknande rörsystem vid bakväggen eller i frysfacket.

En del hus värms upp med hjälp av en värmepump. Här tas entropi från utomhusluften, ett vattendrag i närheten eller från marken. Även vattnet i vissa simbassänger värms på detta sätt.

En annan apparat där en värmepump kommer till användning är luftkonditioneringen. En luftkonditionering reglerar temperaturen och luftfuktigheten inomhus. Den måste bland annat kunna kyla ner inomhusluften och detta sker med hjälp av en värmepump. Figur 10.9 visar ett enkelt klimataggregat för kylning av inomhusluften. De flesta klimataggregaten kan idag köras åt båda hållen, dvs de kan användas både för uppvärmning och kylning.

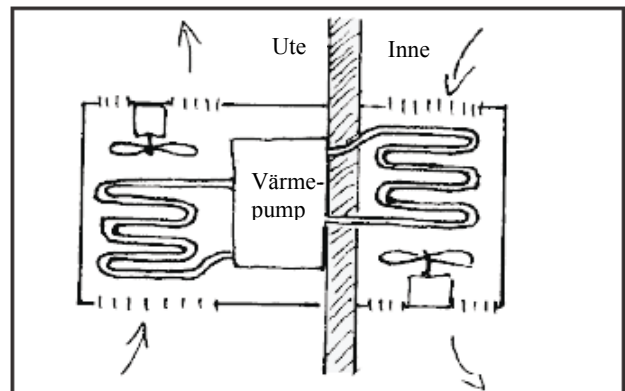


Fig 10.9 Enkelt klimataggregat. Fläktarna inne och ute är till för att förbättra värmeutbytet med luften.

Uppgifter

1. Undersök kylskåpet hemma. Leta efter värmepumpen samt ingången och utgången för entropin. Håll handen mot entropiutgångens rörsystem.
2. Vad händer med entropin om man låter kylskåpsdörren stå öppen ett tag?

10.4 Den absoluta temperaturskalan

Hur mycket entropi kan man pumpa ut ur ett föremål? Hur mycket entropi innehåller det?

Det är viktigt att inse att det är två olika frågor.

Om det bara finns positiv entropi så kan man bara pumpa ut så mycket entropi som det finns i föremålet, på samma sätt som man inte kan pumpa ut mera luft ur en behållare än vad som finns i den.

Det vore annorlunda om det även fanns negativ entropi. Då skulle man även kunna få ut entropi ur ett föremål med 0 carnot entropiinhåll. Om man till exempel tar ut ytterligare 5 Ct så skulle entropiinhållet efteråt uppgå till -5 Ct. Men finns det negativ entropi?

Frågan kan besvaras experimentellt med hjälp av en mycket bra värmepump. Ta exempelvis en tegelsten och pumpa ut entropin så länge det går. Med hjälp av ett kylskåp kan man kanske sänka stenens temperatur till -5 °C. Med en frys kommer man ner till ca -18 °C. Med bättre (och dyrare) värmepumpar kan man komma mycket längre ner, kanske till -200 °C. Sådana maskiner används för framställning av flytande luft. Med ännu dyrare maskiner kan man komma ner till -270 °C, men hur mycket man än försöker så kan man aldrig komma längre ner än till $-273,15$ °C.

För detta finns en enkel förklaring:

1. Vid denna temperatur innehåller stenen inte längre någon entropi.
2. Entropin kan inte anta negativa värden.

Den lägsta temperatur som ett föremål kan anta är $-273,15$ °C. Vid denna temperatur har föremålet inte längre någon entropi.

Vid $\vartheta = -273,15$ °C är $S = 0$ Ct.

Efter upptäckten att det finns en lägsta temperatur var det rimligt att införa en ny temperaturskala. Den nya absoluta temperaturskalan är förskjuten mot Celsius-skalan så att dess nollpunkt ligger vid $-273,15$ °C. Symbolen för den absoluta temperaturskalan är T och enheten 1 kelvin, förkortad K. Figur 10.10 visar hur skalorna hänger ihop. Lagg märke till att temperaturdifferensen 1 °C är lika mycket som temperaturdifferensen 1 K.

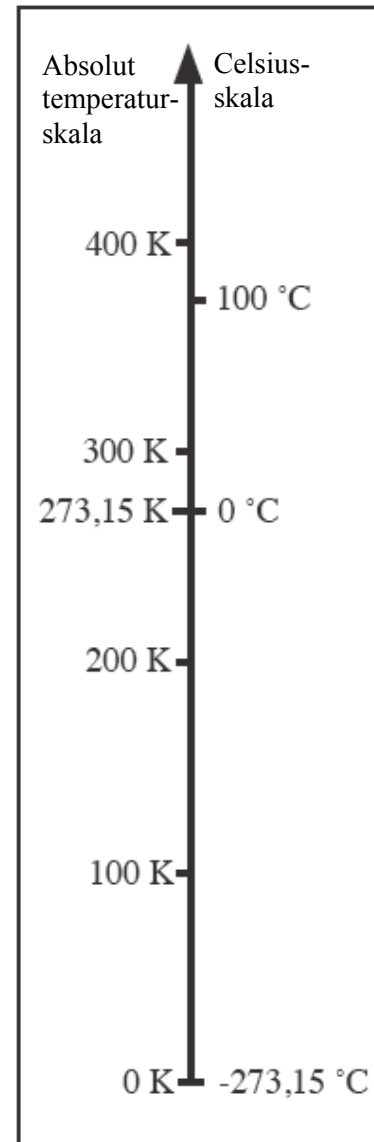


Fig 10.10 Celsius-skala och absolut temperaturskala

Vattnets kokpunkt är på Celsius-skalan

$$\vartheta = 100 \text{ °C}$$

och på den absoluta temperaturskalan

$$T = 373,15 \text{ K.}$$

Den absoluta temperaturskalans nollpunkt ligger vid $-273,15\text{ }^\circ\text{C}$. Enheten för den absoluta temperaturen är 1 kelvin.

Figur 10.11 visar sambandet mellan entropi-innehållet och temperaturen för en kopparbit med massan 100 g.

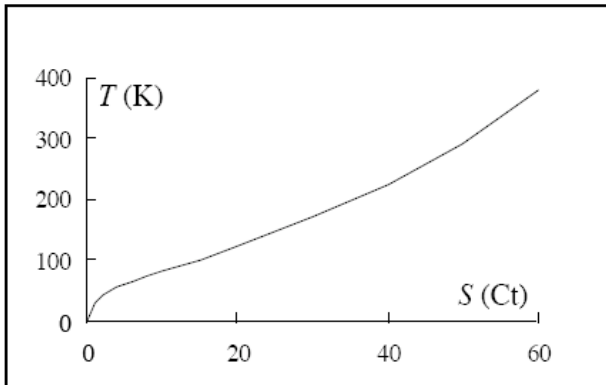


Fig 10.11 Temperatur som funktion av entropi-innehåll för 100 g koppar.

Uppgifter

1. Ange följande Celsius-temperaturer i absoluta temperaturer:

$0\text{ }^\circ\text{C}$	(vattnets smältpunkt)
$25\text{ }^\circ\text{C}$	(normaltemperatur)
$100\text{ }^\circ\text{C}$	(vattnets kokpunkt)
$-183\text{ }^\circ\text{C}$	(syrets kokpunkt)
$-195,8\text{ }^\circ\text{C}$	(kvävetets kokpunkt)
$-268,9\text{ }^\circ\text{C}$	(kokpunkten för helium)
$-273,15\text{ }^\circ\text{C}$	(absoluta nollpunkten)

2. Ange följande absoluta temperaturer i Celsius-temperaturer

$13,95\text{ K}$	(vätets smältpunkt)
$20,35\text{ K}$	(vätets kokpunkt)
$54,35\text{ K}$	(syrets smältpunkt)
$63,15\text{ K}$	(vätets smältpunkt)

10.5 Entropialstring

För att värma upp ett rum kan man använda en värmepump. Man hämtar entropi utifrån inhuset. I verkligheten fungerar de flesta uppvärmningssystemen annorlunda. Man använder ett bränsle såsom ved, olja, kol eller en brännbar gas. Förbränningen är en kemisk reaktion där ett bränsle och syre omvandlas i andra ämnen, för det mesta i koldioxid och vatten(ånga). Men varifrån kommer den entropi som lågorna avger vid förbränningen? Den fanns tidigare varken i bränslet eller i syret. Det är uppenbart att den

bildas vid förbränningen. I lågan alstras entropi, se figur 10.12.

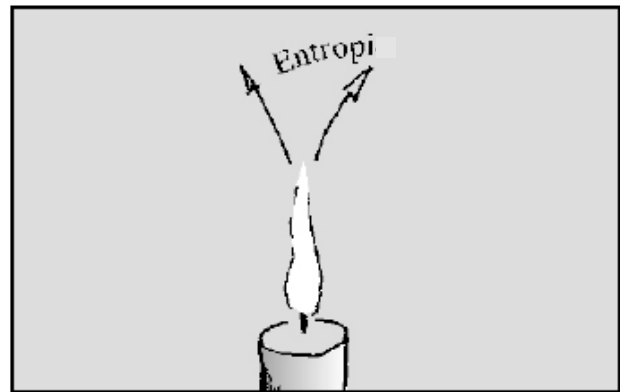


Fig 10.12. I lågan alstras entropi.

En annan uppvärmningstyp är elvärme. En kraftig ström skickas genom en tunn tråd som därigenom hettas upp. I tråden alstras entropi, se figur 10.13. Många elektriska apparater fungerar enligt denna princip: kokplattan, strykJärnet, tekokaren, elradiatorn, hårtorkens värmspiral, glödlampan.

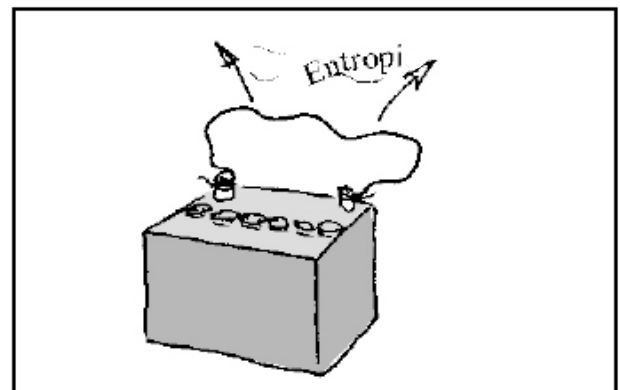


Fig 10.13. Genom tråden flyter det en elektrisk ström. Därvid alstras entropi.

Det finns även en tredje metod att alstra entropi: *Entropi kan uppstå genom mekanisk friktion mellan två kontaktytor som gnids mot varandra.*

Vid alla dessa händelser alstras entropin ur ingenting, den kommer inte från någon annanstans.

Entropi kan alstras

- genom en kemisk reaktion (t ex förbränning)
- i en strömförande tråd
- genom mekanisk friktion.

Alla dessa processer kan för övrigt uppfattas som ett slags friktion. Alltid när något flödar genom en förbindelse eller en ledning som gör motstånd mot det som strömmar uppstår det ”friktion”.

När vi nu har diskuterat frågan hur man får entropi för att värma upp ett rum eller ett föremål ska vi också diskutera den omvända situationen: Hur ska man göra för att kyla ner ett föremål? En metod känner vi redan till: Man kan pumpa ut entropi ur föremålet med hjälp av en värmepump.

En annan metod fungerar då föremålet är varmare än dess omgivning, dvs när den har högre temperatur. Om exempelvis teet är för hett så väntar man en stund. Entropin flödas av sig själv ut i omgivningen.

I båda fallen, med eller utan värmepump, dyker den entropi som har försvunnit från föremålet upp på ett annat ställe. Men går det inte att förstöra entropin? Den kan ju alstras ur ingenting.

Många uppfinnare och naturvetare har försökt detta – utan framgång. Idag anses det vara ett faktum att entropin inte kan förstöras.

Entropi kan skapas, men inte förintas.

Vi kan jämföra detta med vad som gäller för energin. Den kan ju varken skapas eller förintas. Om mängden energi ökar på ett ställe måste den minska lika mycket på ett annat ställe och tvärtom.

Energi kan varken skapas eller förintas.

Det faktum att entropin kan skapas leder till märkvärdiga konsekvenser.

Ett första problem handlar om entropisituationen på jorden. En mycket riklig entropikälla är förbränningar. Dessa äger inte bara rum i ugnar, värmepannor och bilmotorer utan i mycket större utsträckning i naturen. I alla levande varor, från mikroberna till däggdjuren sker ständigt oxidationsreaktioner (dvs förbränningar) och därvid alstras entropi. Borde då inte den totala entropin på jorden öka hela tiden, dvs jorden bli allt varmare? I verkligheten har jordens medeltemperatur varit i stort sett konstant

under miljontals år. Förklaringen är att det inte räcker att betrakta jorden isolerad. För det första tar jorden hela tiden entropi genom solljuset. (Entropin flödar av sig själv från den ca 6000 K varma solytan till jorden med en yttemperatur på ca 300 K). För det andra avger jorden ständigt entropi till världsrymden. (Återigen flödar entropin från det varmare till det kallare området. Världsrymden har en temperatur på ca 3 K.) Även den avgivna entropin transporteras av ljus, som dock är osynligt för det mänskliga ögat. Det rör sig om så kallad infraröd strålning. Denna strålning transporterar bort så mycket entropi att jordens temperatur förblir i det närmaste konstant. Frågan kvarstår förstas vad som händer med världsalltet, om dess entropi ökar hela tiden. Denna fråga är inte helt besvarad ännu.

Att man kan alstra men inte förintas entropi har även en annan märklig konsekvens. Någon spelar upp en film (utan ljud), men säger inte om filmen går framlänges eller baklänges. Kan man då se åt vilket håll filmen går? I figur 10.14 visas en ”film” med ett ljus som brinner ner. Spelas filmen upp åt fel håll visar den något som inte finns i verkligheten: ett ljus som blir större av sig självt. Filmen visar alltså en händelse som inte är *reversibel* (*omvändbar*). Vår för är denna händelse irreversibel? Därför att det alstras entropi och den omvända situationen skulle innebära att entropi förintas – och det är inte möjligt.

En annan irreversibel process visas i figur 10.15. En person glider nerför en klätterstång. Även denna process kan inte gå baklänges, eftersom det alstras entropi.

Men det finns händelser som kan gå både fram- och baklänges: alla förlopp där det inte alstras någon entropi. I figur 10.16 visas en boll som flyger förbi ett fönster. Rörelse sig bollen från vänster till höger såsom filmen visar? Eller gick filmen baklänges och bollen rörelse sig i verklighet från höger till vänster?

Händelser där det alstras entropi är irreversibla.



Fig 10.14. Ljuset som brinner ner är en irreversibel process.



Fig 10.15. Visas bilderna i rätt ordning?

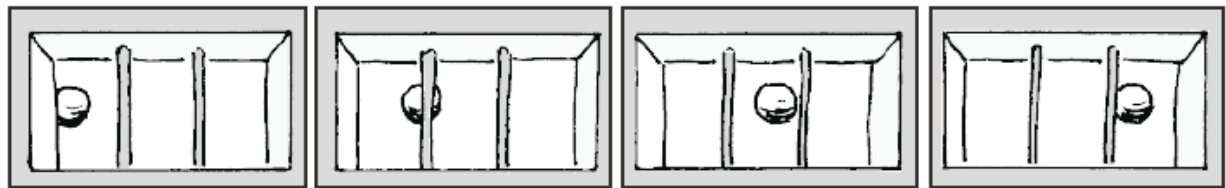


Fig 10.16. Bollen som flyger förbi är en reversibel process.

Uppgifter

1. En lampa är ansluten till ett batteri. Lampan lyser och batteriet töms så småningom. Hur skulle det omvända förloppet gå till (förutsatt att det vore möjligt att förinta entropi)?
2. Redogör i detalj för vad som skulle hända om händelseförloppet "en bil som kör" skulle kunna gå baklänges (förutsatt att det vore möjligt att förinta entropi)?
3. En person som cyklar bromsar. Vad skulle hända om händelsen avlöpte baklänges (förutsatt att det vore möjligt att förinta entropi)?

10.6 Entropiströmstyrkan

Metallstaven i figur 10.17 värms upp i dess vänstra ände och kyls i dess högra ände. Med andra ord, på vänstra sidan tillförs staven entropi, på högra sidan bortförs entropi. I staven strömmar entropi från vänster till höger, från området med hög temperatur till området med låg temperatur. Vi säger att det flyter en *entropiström* och definierar entropiströmstyrkan:

$$\text{Entropiströmstyrka} = \frac{\text{entropi}}{\text{tid}}$$

Entropiströmstyrkan betecknas med symbolen I_S . Därmed kan man skriva:

$$I_S = \frac{S}{t}$$

Enheten för entropiströmstyrkan är en carnot per sekund, förkortad 1 Ct/s.

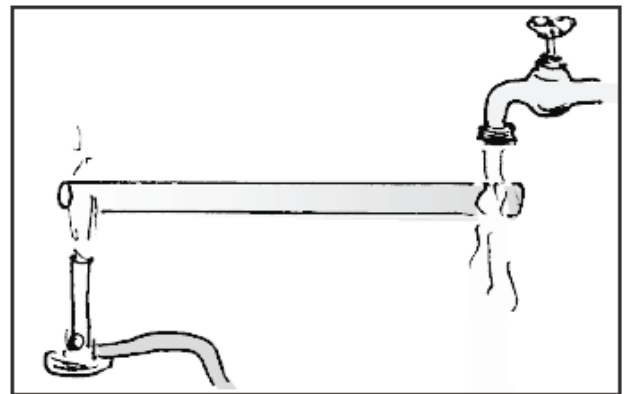


Fig 10.17. En entropiström flyter från stavens varma till dess kalla ände.

Vad beror storleken på entropiströmstyrkan mellan två kroppar A och B på? Se figur 10.18. I den övre situationen är temperaturskillnaden mellan A och B större än i den nedre. Annars är situationerna lika. Eftersom drivkraften för entropiströmmen är större i den övre delen än i den nedre är även strömstyrkan större där.

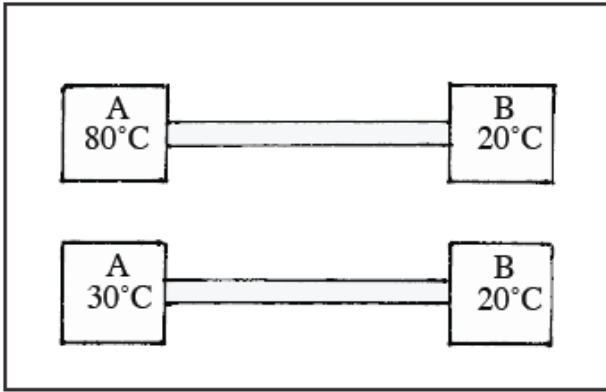


Fig 10.18. I den övre situationen är temperaturdifferensen mellan kropp A och B större än i den nedre.

Ju större temperaturdifferensen mellan två ställen (ju större drivkraft) desto större är entropiströmmen som flyter från det ena till det andra stället.

10.7 Värmemotståndet

Entropiströmstyrkan kan dock variera även om temperaturdifferensen är densamma. Den beror nämligen inte bara av temperaturdifferensen utan också av vilken sorts förbindelse det är, dvs av förbindelsens *värmemotstånd*, se figur 10.19. Vad beror en förbindelses värmemotstånd på?

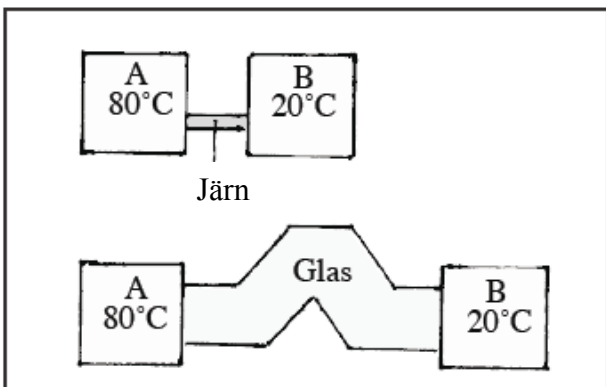


Fig 10.19 Förbindelser med olika värmemotstånd.

I figur 10.20 visas två entropiledningar a och b med samma temperaturdifferens mellan deras ändar, nämligen 60 K. Men ledning b har dubbelt så stor tvärsnittsarea som ledning a. Genom varje halva av ledning b strömmar lika mycket entropi som genom ledning a. Därför strömmar det dubbelt så mycket entropi genom ledning b som genom ledning a.

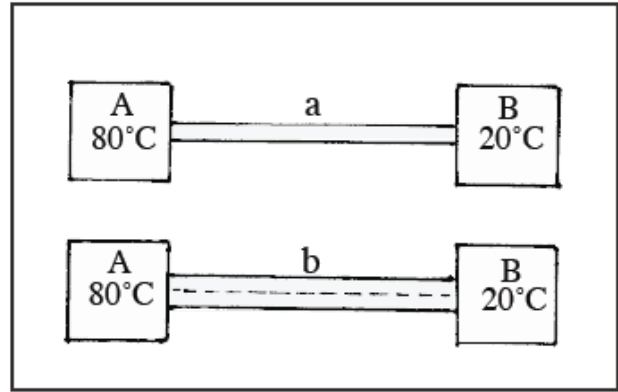


Fig 10.20. Genom den tjockare ledningen flyter en större entropiström.

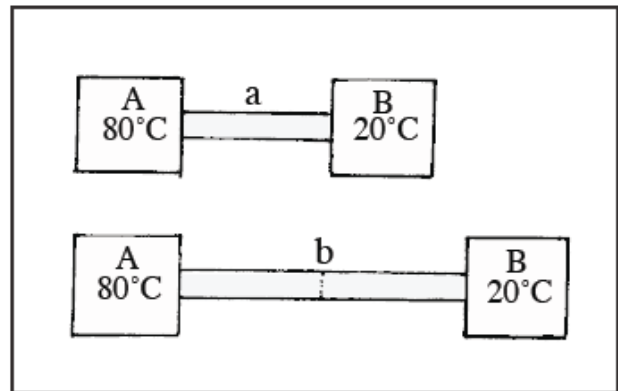


Fig 10.21. Genom den kortare ledningen flyter en större entropiström.

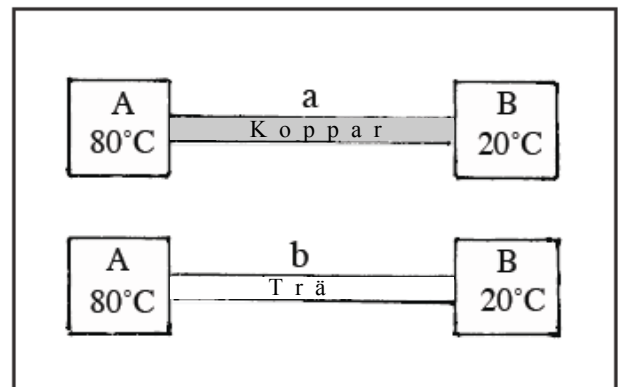


Fig 10.22. Genom kopparledningen flyter en större entropiström än genom ledningen av trä.

I figur 10.21 visas återigen två ledningar a och b. Den här gången är ledning b dubbelt så lång som ledning a. Jämför nu t ex vänstra halvan av ledning b med ledning a. Båda ledningar är identiska, men temperaturdifferensen över a är större än över vänstra halvan av b. Därför flyter en svagare entropiström genom denna del av b än genom a. Naturligtvis flyter också en svagare entropiström genom den andra halvan av b.

Slutligen visas i figur 10.22 två ledningar som är lika långa och som har samma tvärsnittsarea. Dessutom är temperaturdifferensen mellan deras ändrar densamma. Ändå flyter det en mindre entropiström genom b än genom a, för b är gjord av trä medan a är gjord av koppar.

Varje ledning gör ett motstånd mot den entropiström som flyter igenom den. Detta värmemotstånd är proportionellt mot ledningens längd och omvänt proportionellt mot dess tvärsnittsarea. Dessutom beror det på materialet i ledningen.

Figur 10.23 sammanfattar vad entropiströmstyrkan och värmemotståndet beror på.

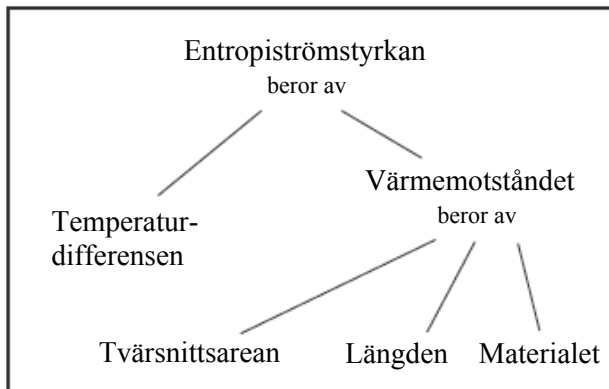


Fig 10.23. Samband mellan entropiströmstyrka, temperaturdifferens och ledningens egenskaper.

Vi undersöker några material med avseende på deras värmemotstånd, med andra ord om de är bra eller dåliga värmeledare. Vi tar en liten stav med fingrarna i ena änden och håller den andra änden i en låga, se figur 10.24. Beroende på materialets värmemotstånd känner fingrarna mer eller mindre snabbt att det blir varmt.

Resultatet av denna undersökning är att trä, glas och plast har ett relativt stort värmemotstånd. Däremot kännetecknas metaller av att deras värmemotstånd är litet, dvs de är goda värmeledare. Luft och andra gaser har ett mycket högt värmemotstånd. Därför används material som innehåller mycket luft för värmeisolering av byggnader såsom mineralull och andra fibermaterial, cellplast, gasbetong, tegel. Även en ylletröja håller värmen därför att ylle innehåller så många luftfyllda hålrum.

Den höga värmeledningsförmågan är också förklaringen varför metalliska föremål ofta känns kallare än lika varma föremål av trä.

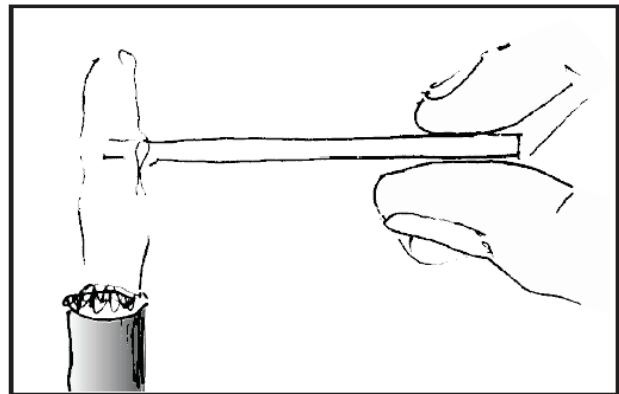


Fig 10.24. Beroende på stavens värmemotstånd uppvärms den högra änden mer eller mindre snabbt.

Om tar i en träbit och en metallbit som båda har temperaturen $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ med fingrar som är $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ varma så flödar det först entropi från fingrarna till föremålen, se figur 10.25. Träet värms snabbt vid beröringspunkten, eftersom det inte kan leda bort entropin. I metallen flödar entropin från beröringspunkten vidare ut i föremålet och själva kontaktpunkten värms bara obetydligt.

Vid högre temperaturen är situationen tvärtom: Om man värmer en bit trä och en bit metall till $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ och rör vid föremålen sedan så känns metallbiten hetare än träbiten.

Hos ett föremål med dålig värmeledningsförmåga känner alltså fingrarna inte av den temperatur som föremålet hade före beröringen utan den temperatur som föremålet får genom att man vidrör det.

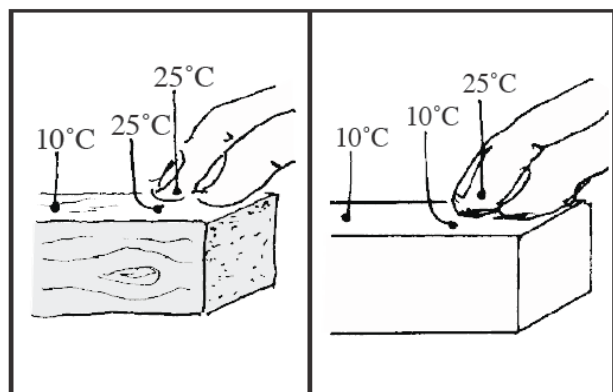


Fig 10.25. Före beröringen har föremålen samma temperatur, efteråt inte längre.

Uppgifter

1. Hur skall ett hus vara byggt för att värmeförlusten (entropiförlusten) skall bli så liten som möjligt?
2. Vid ett vattenburet värmesystem skall entropin så lätt som möjligt kunna flöda från vattnet i värmeelementet ut till den omgivande luften. Hur kan man åstadkomma det? Ange andra föremål där god värmeledningsförmåga är viktig.

10.8 Entropitransport genom konvektion

En temperaturdifferens är drivkraften för en entropiström. Om man vill transportera entropi från en plats A till en annan plats B räcker det att se till att A har högre temperatur än B. Denna typ av entropitransport kallas värmeledning.

De flesta entropitransporterna, särskilt om de går över stora avstånd, sker emellertid på andra sätt. En annan metod för entropiöverföring är *konvektiv entropitransport* eller *konvektion*.

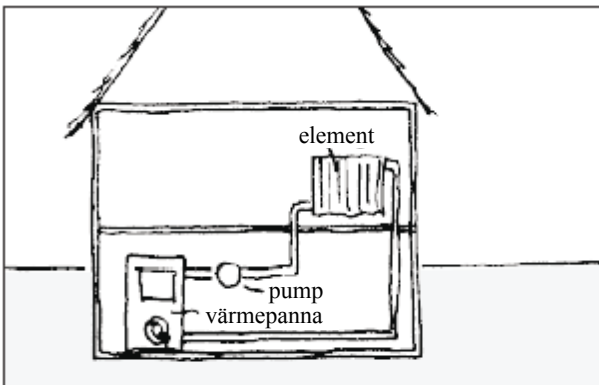


Fig 10.26. Centralvärme. Entropin strömmar konvektivt från pannan till elementen.

Man värmer en vätska eller gas och transporterar denna vätska respektive gas från A till B, exempelvis med hjälp av en pump. Det flyttade materialet tar med sig entropin helt enkelt. Här krävs ingen temperaturdifferens som drivkraft, men det måste finnas någonting som driver på vätske- eller gasströmmen.

Ett exempel för konvektiv entropitransport är centralvärmens i ett hus, se figur 10.26. I pannan i källaren värms vatten, till exempel genom förbränning av ved. Det varma vattnet pumpas genom rör till husets olika rum. I elementen avger vattnet en del av sin entropi och flödar

sedan tillbaka till pannan genom en returledning.

Det är mycket lättare att åstadkomma konvektiva entropitransporter än sådana som drivs av temperaturdifferenser. Skälet är att det inte finns några riktigt bra värmeledare. Till och med koppar med sin relativt höga värmeledningsförmåga är i grund och botten en dålig värmeledare. Det vore till exempel omöjligt att transportera entropin från pannan till elementen i de olika rummen med hjälp av kopparstavar. Däremot är det inga problem att transportera vatten eller luft med deras entropiinhåll över stora avstånd.

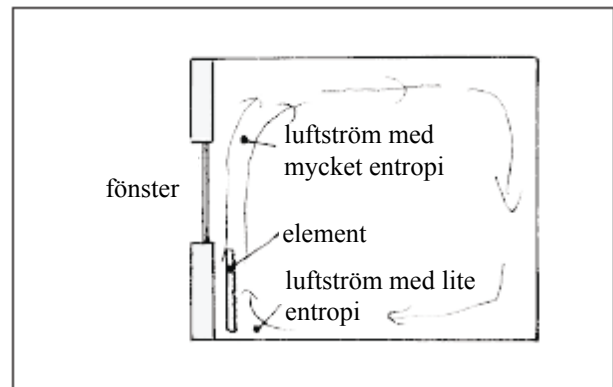


Fig 10.27. Entropin fördelas i rummet genom konvektion.

Konvektiv entropitransport: Entropin förs med av en strömmande vätska eller gas. För en konvektiv entropitransport krävs ingen temperaturdifferens.

Konvektiva entropiströmmar finns det många exempel på i natur och teknik.

I ett uppvärmt rum skall entropin fördelas från elementet ut i hela rummet. Hur går det till, då luft är en mycket dålig värmeledare? Entropin transporteras konvektivt med luften. Här behövs det inte ens någon pump. Luften vid elementet värms upp och stiger uppåt, eftersom varm luft har lägre densitet än kall luft, se figur 10.27.

Varje bilmotor måste kylas, dvs entropi måste föras bort från motorn, se figur 10.28. De flesta bilmotorerna är vattenkylda. Entropin transporteras precis som i centralvärmeanläggningen med hjälp av vatten från motorn till kylaren. Kylvattenpumpen driver vattencirkulationen. I kylaren avges entropin till den förbiströmmande luften.

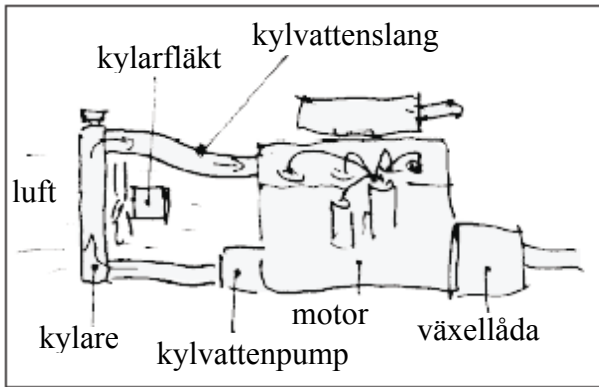


Fig 10.28 Bilmotorns kylsystem. Entropin strömmar konvektivt från motorn till kylaren.

Även alla stora entropitransporter i naturen är konvektiva. Det är dessa som bestämmer vårt väder. I atmosfären transporteras entropi med vinden, dvs strömmande luft, över mycket stora avstånd.



Fig 10.29. Golfströmmen. Entropi transporteras med strömmande vatten från Västindien till Europa.

Ett annat intressant exempel för konvektiv entropitransport är Golfströmmen. Den transporterar entropi från Västindien till Europa, se figur 10.29. Därför har Europa ett mildrare klimat än vad man skulle vänta sig på grund av dess geografiska läge.

Vi jämför än en gång entropitransport genom värmeledning med transport genom konvektion genom att följa entropins väg i ett hus med centralvärme. I exempelvis en vedpanna alstras entropin av lågorna och strömmar konvektivt till vattenbehållarens yttervägg. Genom denna vägg vandrar entropin på det normala sättet genom ledning, driven av en temperaturskillnad. Därefter strömmar den med vattnet konvektivt till elementen. Genom elementets väggar flödar entropin återigen på det vanliga sättet.

Från elementets yta strömmar entropin sedan konvektivt till de olika platserna i rummet. Man ser alltså att entropin på den långa vägen från pannans lågor till det rum som skall värmas upp bara över mycket korta avstånd, några millimeter bara, transporteras genom vanlig värmeledning.

Entropitransporter över stora avstånd är oftast konvektiva.¹

Uppgifter

1. Beskriv på vilka sätt huset förlorar entropi. Vilka förluster beror på värmeledning, vilka på konvektion?
2. Beskriv entropins väg från en bilmotors inre till den omgivande luften. På vilka vägavsnitt flödar entropin på grund av en temperaturdifferens, på vilka strömmar den konvektivt?
3. Hur fungerar bilens värmesystem? Beskriv entropins väg.

¹ Det finns ytterligare ett sätt för entropitransporter. Mer om detta kan du läsa i kapitel 14.

11. Entropi och energi

11.1 Entropin som energibärare

Vi vill göra en energi- och entropiberäkning för ett elvärmesystem. Elvärme är inget annat än en tråd som är genomfluten av en elektrisk ström och som hettas upp av strömmen. Förutom i element har denna typ av uppvärmning många andra tillämpningar: spisplattor, strykjärn, glödlampor...

Vi vet å ena sidan att värmeanläggningen alstrar entropi. Å andra sidan vet vi att anläggningen "förbrukar" energi, dvs att energi strömmar in i den genom elkablarna. Den elektriska strömmen är bärare för den inkommande energin.

Men den energi som transporteras in i anläggningen med den elektriska strömmen måste komma ut igen. Och här kan man undra vilken energibärare som för med sig denna energi.

Svaret ligger nära till hands. Förutom energi kommer det även entropi ur värmeanläggningen. Det är alltså entropin som är den önskade energibäraren. Detta konstaterande kan generaliseras: Överallt där det flödar en entropi-ström finns det också en energiström.

Entropi är en energibärare.

Elvärmeanläggningen är en energiomlastare. Energin transporteras med den elektriska strömmen som bärare in i anläggningen. Där alstras det entropi som fungerar som bärare för den bortforslade energin. Energin lastas alltså om från den elektriska strömmen till entropin. En schematisk bild för elvärmeanläggningen visas i figur 11.1.

Flödesdiagrammet är ännu inte helt färdigt. Energibäraren för den inströmmande energin måste komma ut ur anläggningen igen, eftersom elektriska laddningar (som den elektriska strömmen består utav) varken kan skapas eller förintas. I figur 11.2 har därför den elektriska strömmen både en in- och en utgång. Lägga märke till att energi och elektrisk ström har både in- och utgång, medan entropin bara har en

utgång, med andra ord: I elvärmeanläggningen lastas energin om på den nyskapade entropin.

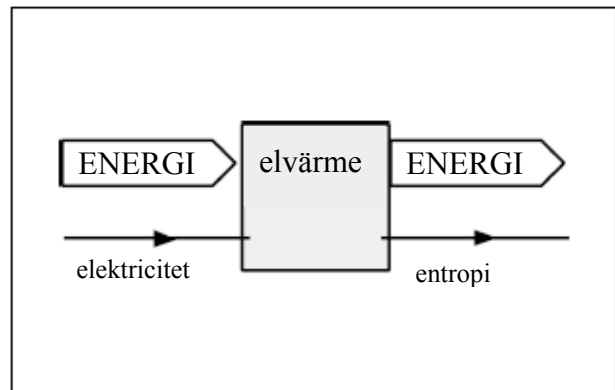


Fig 11.1. Energiflödesschema för elvärme.

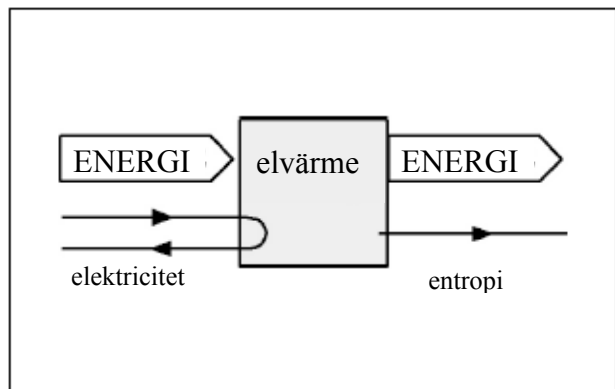


Fig 11.2. Kompletterat energiflödesschema för elvärme.

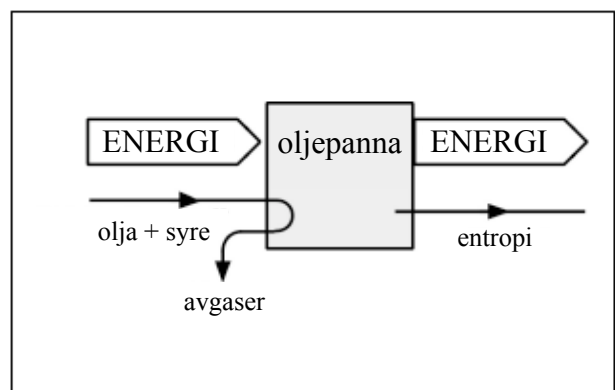


Fig 11.3. Energiflödesschema för en oljepanna.

Dessa funderingar gäller även andra processer där det alstras entropi. Figur 11.3 visar flödesdiagrammet för en oljepanna. Energi flödar in i panna med bäraren "olja + syre". Under "avlastningen" av energin övergår oljan och syret i

avgaser (vattenånga och koldioxid). Vid förbränningen alstras entropi och energin lämnar pannan med denna entropi.

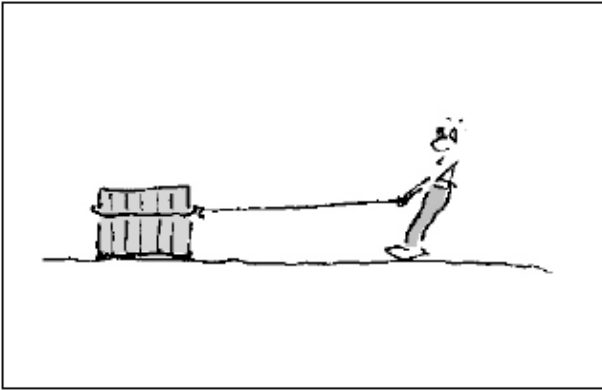


Fig 11.4. På lådans undersida alstras entropi.

Uppgifter

1. Rita energiflödesschemat för friktionshändelsen i figur 11.4. Tips: "Energiomlastaren" är lådans undersida, där friktion uppträder.
2. Ett torn av byggklossar störtar omkull. I vilken del av denna händelse alstras energi? Varifrån kommer den nödvändiga energin?

11.2 Sambandet mellan energiström och entropiström

Varje entropiström åtföljs av en energiström (ett annat ord för effekt). Hur hänger styrkorna i dessa båda strömmar ihop? Det finns ett enkelt delsvar på denna fråga: Ju starkare entropiströmmen är desto starkare är energiströmmen. Två lika starka entropiströmmar bär dubbelt så mycket energi som bara en, dvs energiströmmen är proportionell mot entropiströmmen:

$$P \propto I_S \quad (1)$$

Detta samband är ännu inte fullständigt. För att finna proportionalitetskonstanten gör vi en balansräkning på liknande sätt som för elvärmeanläggningen i förra avsnittet, den här gången för en elektrisk värmepump.

Figur 11.5 visar ett förenklat flödesdiagram för denna energiomlastare. Till varje ström som flödar in i apparaten finns nu en lika stark ström som flödar in i den, även till entropiströmmen. Energin transporteras återigen med den elekt-

riska strömmen som energibärare. Den elektriska strömmen lämnar värmepumpen efter det att energin har lastats av. Å andra sidan flödar entropi in i värmepumpen. På denna entropi lastas den energi som ursprungligen kommit med den elektriska strömmen. Energin lämnar pumpen med den utströmmande entropin.

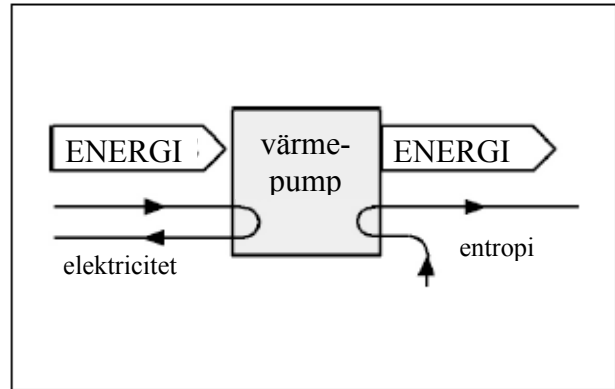


Fig 11.5. Energiflödesschema för en värmepump (inte fullständigt)

Låt oss titta närmare på flödesdiagrammets högra sida. Den högra energipilen visar bara den energi som kommit med den elektriska strömmen. Figur 11.6 visar en noggrannare bild över situationen. Även den entropi som flödar in i värmepumpen bär ju energi. Den utströmmande entropin bär dock mer energi än den inflödande: Det tillkommer den energi som följt med den elektriska strömmen.

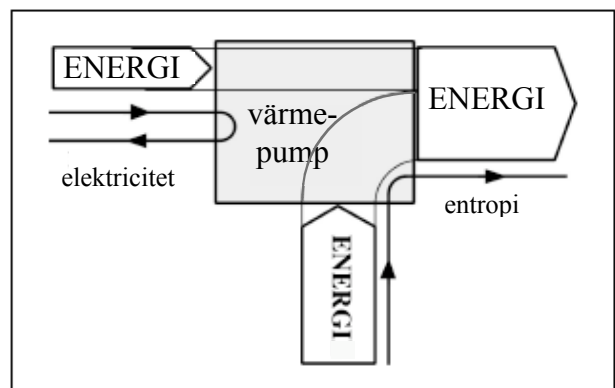


Fig 11.6. Värmepump med ett mera detaljerat schema över de energiströmmar som följer med entropin

Ur figur 11.6 framgår att två lika starka entropiströmmar kan bära olika mycket energi. Energi-strömstyrkan är alltså beroende av något annat än entropiströmstyrkan.

Men vad är skillnaden mellan entropi-ingången och -utgången? Svaret är temperaturen. Energi-strömstyrkan måste också vara beroende av temperaturen hos ledaren för entropin, med andra ord: Proportionalitetskonstanten i sambandet (1) är beroende av temperaturen.

I verkligheten är sambandet ännu enklare. Proportionalitetskonstanten är inget annat än den absoluta temperaturen T :

$$P = T \cdot I_S \quad (2)$$

Detta är ingen slump. Den absoluta temperaturskalan är nämligen definierad med hjälp av ekvation (2).

En entropiström med styrkan I_S bär en energiström med styrkan $T \cdot I_S$.

Ekvation (2) kan också tolkas så här:

Temperaturen anger hur mycket energi en entropiström bär.

Nu går det att ställa upp en exakt kvantitativ energibalansräkning för värmepumpen. Låt T_A vara den temperatur vid vilken entropin flödar in i värmepumpen och T_B den temperatur vid vilken den kommer ut ur den. Den inkommande energiströmmen (vid låg temperatur) har då styrkan:

$$P_A = T_A \cdot I_S$$

Den utgående energiströmmen (vid hög temperatur) har styrkan:

$$P_B = T_B \cdot I_S.$$

Nettovärdet för energiströmstyrkan är alltså:

$$P = P_B - P_A = T_B \cdot I_S - T_A \cdot I_S$$

Högerledet kan skrivas om:

$$P = (T_B - T_A) \cdot I_S \quad (3)$$

Nettoenergiströmmen måste vara lika stor som den energiström som kommer in i värmepumpen via elkabeln. Ekvation (3) anger alltså värmepumpens energiförbrukning.

Värmepumpen förbrukar mer energi

- **ju mer entropi den måste transportera,**
- **ju större temperaturskillnad den måste övervinna.**

Exempel: En värmepump, som används för uppvärmning av ett hus, transporterar per sekund 30 Ct in i huset. Yttertemperaturen är 10 °C, innertemperaturen 22 °C. Hur stor är värmepumpens energiförbrukning?

Lösning: Temperaturdifferenser i °C och i K är desamma, dvs $T_B - T_A = 12 \text{ °C} = 12 \text{ K}$. Därmed är $P = (T_B - T_A) \cdot I_S = 12 \text{ K} \cdot 30 \text{ Ct/s} = 360 \text{ W}$.

Låt oss anta nu att samma hus värms upp med vanlig elvärme, dvs entropin pumpas inte in i huset utifrån utan alstras inne i huset. Även i det här fallet skall inomhustemperaturen vara 22°C och vi behöver återigen 30 Ct/s, för huset förlorar ju lika mycket entropi genom väggarna. Styrkan hos den energiström som kommer ut ur elvärmeanläggningen beräknas med ekvation (2), där $T = (273 + 22) \text{ K} = 295 \text{ K}$ och $I_S = 30 \text{ Ct/s}$:

$$P = T \cdot I_S = 295 \text{ K} \cdot 30 \text{ Ct/s} = 8850 \text{ W}.$$

Energiförbrukningen för elvärmeanläggningen är enligt våra beräkningar mycket större än för värmepumpen. I verkligheten är skillnaden dock mindre, eftersom det även alstras lite entropi i värmepumpen.

Uppgifter:

1. Ett hus, som värms med hjälp av en oljepanna till inomhustemperaturen 20 °C, har en entropiförlust av 35 Ct/s. Hur stor är värmepannans energiförbrukning?
2. En 90 °C varm kylare i en bil avger 60 carnot per sekund till den omgivande luften. Hur stor är den energiström som flödar ur kylaren ut i luften?
3. Temperaturen på undersidan av ett strykjärn som är märkt 1000 W uppgår till 300 °C. Hur mycket entropi flödar ut ur strykjärnet varje sekund?
4. En simbassäng värms med en värmepump som tar entropin ur en närliggande bäck. Bäckens vattentemperatur är 15 °C, vattnets temperatur i simbassängen är 25 °C. Vattnet i bassängen förlorar varje sekund 500 Ct entropi till omgivningen. För att temperaturen i simbassängen skall vara konstant måste värmepumpen ersätta den förlorade entropin. Hur stor är värmepumpens energiförbrukning?
5. (a) Ett hus värms med hjälp av en värmepump. Yttertemperaturen är 0 °C, inomhustemperaturen 25 °C. Värmepumpen transporterar entropin 30 carnot per sekund. Hur stor är dess energiförbrukning?

(b) Samma hus värms upp med hjälp av elvärme, dvs de 30 Ct/s pumpas inte in i huset utifrån, utan alstras inne i huset. Hur stor är energiförbrukningen nu?

11.3 Entropialstring genom entropi-strömmar

Genom en stav av ett material som är en bra värmeledare flödar en entropiström, se figur 11.7. Entropiströmmen upprätthålls genom en temperaturdifferens. Stavens yta (utom ändarna) är värmeisolerad så att ingen entropi kan utträda där. I början av experimentet kommer temperaturen på de olika ställena i staven att ändras, men efter en stund avstannar ändringarna. Det uppstår en *flödesjämvikt*.

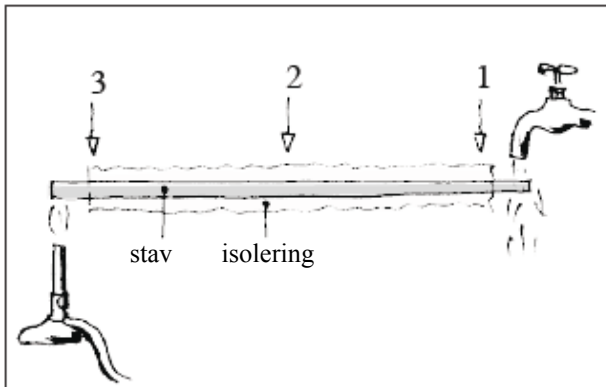


Fig 11.7. Vid stavens högra ände kommer det ut mer entropi än vad som flödat in i den vänstra änden.

Den ekvation som visar sambandet mellan entropi- och energiströmstyrkan ger för detta experiment ett överraskande resultat.

Vi tittar närmare på tre olika ställen på staven: den högra, kalla änden, mitten och den vänstra, varma änden. I den vänstra änden flödar det en energiström med styrkan P_3 i staven. På grund av flödesjämvikten kan ingen energi anhopas någonstans och energiströmmen måste ha samma storlek överallt i staven:

$$P_3 = P_2 = P_1 \quad (4)$$

Å andra sidan hänger energiströmstyrkan P ihop med entropiströmstyrkan I_S enligt:

$$P = T \cdot I_S \quad (5)$$

Genom att ersätta energiströmstyrkorna i ekvation (4) med hjälp av ekvation (5) får man:

$$T_3 \cdot I_{S3} = T_2 \cdot I_{S2} = T_1 \cdot I_{S1} \quad (6)$$

Vi vet att temperatur T_3 är större än T_2 och T_2 större än T_1 :

$$T_3 > T_2 > T_1$$

För att ekvation (6) skall stämma måste

$$I_{S3} < I_{S2} < I_{S1},$$

med andra ord: Entropiströmmen i staven ökar från vänster till höger. På höger sida, vid kylvattnet, kommer det ut mera entropi än vad som strömmade in på vänster sida, vid lågan. Alltså måste entropi ha alstrats inne i staven. Hur är detta möjligt?

Resultatet är inte så överraskande som det verkar vara vid första anblicken. Tidigare har vi konstaterat att det alstras entropi där det förekommer något slags friktion, dvs när en ström måste övervinna ett visst motstånd. Så är fallet även här. Det som strömmar här är inte någon vätska eller gas, inte heller någon elektrisk ström utan själva entropin. Även när entropi strömmar genom ett motstånd alstras ny entropi.

Vi kan tänka oss att entropin vid utgången av staven, dvs vid dess högra ände, består av två delar: den del som strömmat in på vänster sida och den del som alstrats på vägen. Alltså är

$$I_{S1} = I_{S3} + I_{S \text{ alstrad}}$$

där $I_{S \text{ alstrad}}$ är den entropi som alstrats per sekund i staven.

Om det strömmar entropi genom ett värmemotstånd alstras ny entropi.

Exempel: Värmetråden i en doppvärmare med 700 W har temperaturen 1000 K (727 °C), se figur 11.8 på nästa sida. Entropiströmmen som lämnar tråden har styrkan

$$I_S = \frac{P}{T} = \frac{700 \text{ W}}{1000 \text{ K}} = 0,7 \text{ Ct/s.}$$

På utsidan har doppvärmaren samma temperatur som vattnet. Låt oss anta att vattentemperaturen är 350 K (77 °C). Då är entropiströmstyrkan på doppvärmarens utsida:

$$I_s = \frac{P}{T} = \frac{700 \text{ W}}{350 \text{ K}} = 2,0 \text{ Ct/s}$$

På den korta sträckan från värmetråden till doppvärmarens utsida alstras alltså

$$2,0 \text{ Ct/s} - 0,7 \text{ Ct/s} = 1,3 \text{ Ct/s}.$$

Den elektriska strömmen alstrar 0,7 Ct/s i värmetråden. Genom entropiströmmen från tråden till utsidan alstras alltså mer entropi än genom den elektriska strömmen.

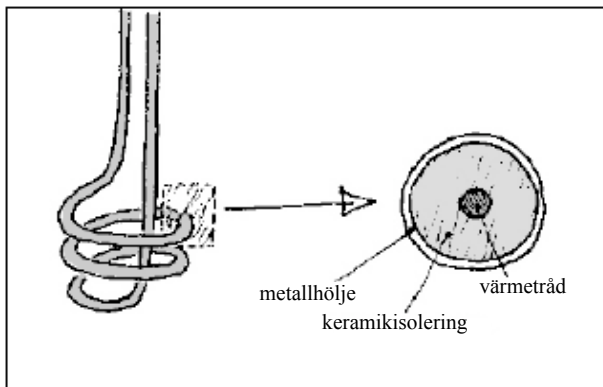


Fig 11.8. Doppvärmare. Till höger i genomskärning (förenklad och förstorad)

Uppgifter

1. Ett hus värms med 20 kW. Innertemperaturen är 20 °C, yttertemperaturen -5 °C.

- Hur stor är entropiströmmen ut från huset på husets innervägg?
 - Hur stor är entropiströmmen på husets yttrevägg?
 - Hur mycket ny entropi alstras per sekund då entropin strömmar ut?
2. Värmetråden i en 1000 W-kokplatta har temperaturen 1000 K.
- Hur mycket entropi alstras per sekund i värmetråden?
 - På kokplattan står en kastrull med vatten vars temperatur är 373 K. Hur mycket entropi strömmar in i vattnet per sekund?
 - Hur mycket ny entropi alstras per sekund på vägen mellan värmetråden och vattnet?

11.4 Värmemotorer

Vad som menas med en värmemotor förklaras bäst med hjälp av dess energiflödesschema, se figur 11.9: en entropiomlastare som får energi

med energibäraren entropi och avger den genom den roterande axeln. Den roterande axeln i sin tur kan användas till att driva andra maskiner. (Energibäraren som är förknippad med en roterande axel kallas rörelsemängdsmoment. Kraftmomentet, som du säkert redan känner till, är inget annat än strömmen av rörelsemängdsmoment.)

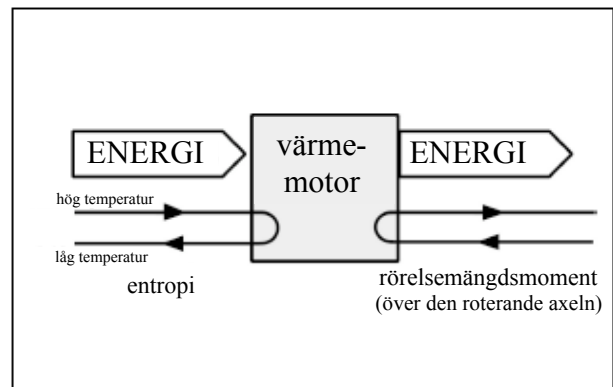


Fig 11.9. Energiflödesschema för en värmemotor

Till värmemotorerna hör:

- ångturbinen
- kolvångmaskinen
- alla förbränningsmotorer (otto- och dieselmotorer)
- jetmotorer
- samt andra, mindre vanliga maskiner.

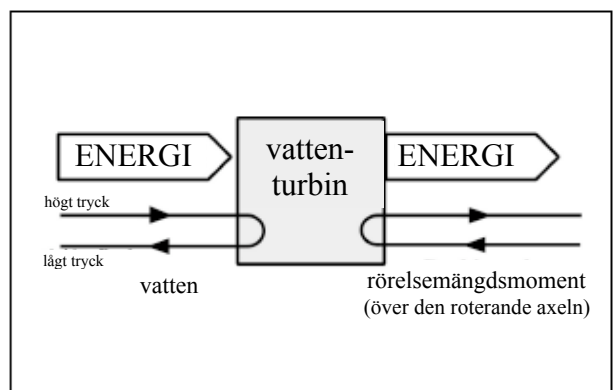


Fig 11.10. Energiflödesschema för en vattenturbin

För att förstå hur dessa värmemotorer fungerar går vi en liten omväg. Figur 11.10 visar energiflödesschemat för en vattenturbin, alltså en maskin som inte är en värmemotor. Vatten med høgt tryck strömmar in i vattenturbinen och lämnar turbinen igen med lågt tryck. Vattnet med det høga trycket bär på mycket energi, det utströmmande vattnet med det låga trycket bär

på lite energi. Medan vattnet går från högt tryck till lågt tryck i turbinen lastar det av energi. Denna energi lämnar turbinen över den roterande axeln (med energibäraren rörelsemängdsmoment).

En jämförelse mellan figur 11.10 och 11.9 visar på en viktig likhet mellan värmemotorn och vattenturbinen. Entropi med hög temperatur, dvs med mycket energi strömmar in i värmemotorn och lämnar den igen med låg temperatur, dvs lite energi. Även här lastas energi av, när entropin går från hög temperatur till låg temperatur och även här lämnar energin motorn över en roterande axel.

I en värmemotor lastas energi av från energibäraren entropi och förs bort av en roterande axel (dvs lastas om på energibäraren rörelsemängdsmoment).

Låt oss nu beräkna den energi som en värmemotor avger per sekund. Vid ingången, dvs där temperaturen T_A är hög, tar maskinen emot en energiström med styrkan $T_A \cdot I_S$. Vid utgången, där det råder en lägre temperatur T_B avges en energiström med styrkan $T_B \cdot I_S$. Differensen är den energiströmstyrka (effekt) som värmemotorn avger över den roterande axeln:

$$P = T_A \cdot I_S - T_B \cdot I_S = (T_A - T_B)I_S$$

En värmemotor avger alltså mer energi

- ju starkare den entropiström är som flödar genom maskinen
- ju större temperaturdifferensen är som entropiströmmen ”faller igenom” i maskinen.

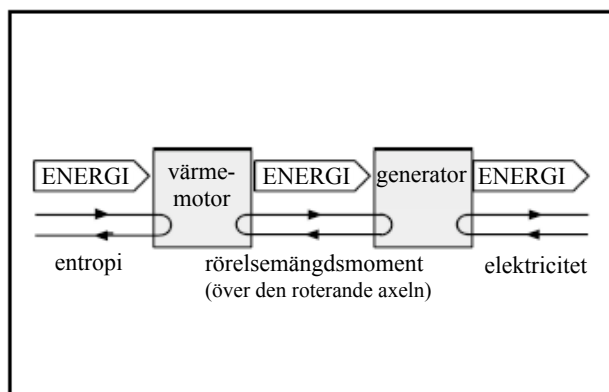


Fig 11.11. Energiflödesschema för ett värmekraftverk

I ett värmekraftverk driver värmemotorn en elgenerator. Flödesschemat för dessa sammankopplade maskiner visas i figur 11.11. Men man kan också förenkla flödesschemat genom att slå ihop de båda energiomlastarna till en enda, se figur 11.12. Jämför detta flödesschema med schemat för en elektrisk värmepump, som visas igen i figur 11.13 (samma som fig 11.5). Det är bara pilarnas riktning som skiljer de båda schemana åt.

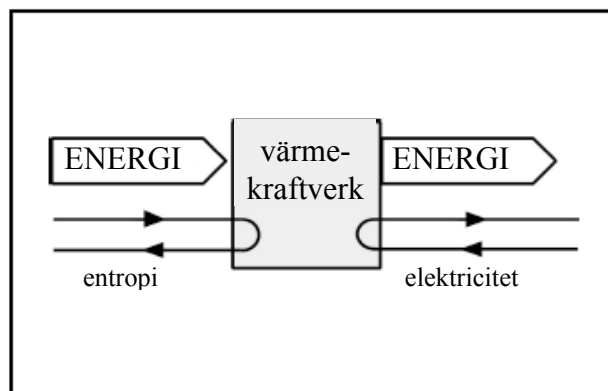


Fig 11.12. Energiflödesschema för ett värmekraftverk. Turbin och generator har sammanfattats till en gemensam symbol.

I värmekraftverket sker alltså precis den omvända processen jämfört med i värmepumpen. Medan elvärmepumpen lastar om energi från elektricitet till entropi lastar värmekraftverket i fig 11.12 om energi från entropi till elektricitet.

Det finns andra apparater, som gör samma sak som de stora och komplicerade värmekraftverken, men som är mycket mindre och samtidigt robusta. Det är de så kallade *peltierelementen*.

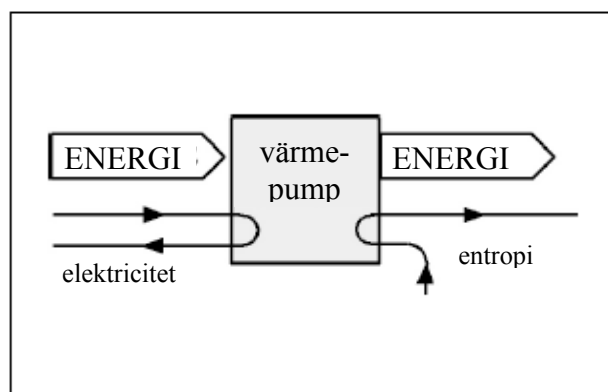


Fig 11.13. Energiflödesschema för en värmepump

Peltierelement kan faktiskt drivas ”åt båda hållen”, både som värmekraftverk och som kom-

pakt och prisvärd värmepump. Tyvärr har de stora energiförluster, vilket begränsar deras användningsområden. Peltierelement används exempelvis som värmepumpar i små kylboxar för bilar.

11.5 Entropikällor för värmemotorer

Om man vill driva en värmemotor uppstår det alltid två problem:

1. Man behöver en entropikälla på hög temperatur.
2. Man behöver en möjlighet att bli av med entropin igen på låg temperatur.

Dessa problem kan lösas på olika sätt.

Naturliga entropikällor

Den lösning som är minst miljöskadlig går ut på att använda naturliga entropikällor på hög temperatur.

Det finns några platser på jorden där det finns het ånga i berggrunden på inte alltför stort djup. Genom borrhål strömmar ångan till ytan och driver ett *geotermiskt* kraftverk. Sådana finns det på Island, men annars är det inte särskilt vanligt med förekomsten av geotermisk energi.

En annan möjlighet är solenergin. Med solljuset får jorden enorma entropimängder på mycket hög temperatur. Att utnyttja dessa är dock ganska svårt. Visserligen är solljuset en utsinlig entropikälla, men entropin och därmed energin är kraftigt ”utspädd” och måste koncentreras från stora solbelysta ytor. I vissa *solkraftverk* fokuseras solljuset med hjälp av stora speglar på en ångpanna. En annan svårighet med solenergin ligger i att solen inte skiner så mycket när den behövs som bäst: på natten och på vintern.

Konstgjorda entropikällor

Största delen av den entropi som används för att driva värmemotorer får man i dagsläget på ett mindre finurligt sätt: genom förbränning av bränslen eller genom kärnklyvning.

Eftersom värmemotorer används i stor utsträckning är inte bara framställningen av entropin ett problem, utan också det ”termiska avfallet”. Vi

skall se hur dessa problem löses för de vanligaste värmemotorerna.

Värmekraftverk

De flesta kraftverken fungerar med ångturbiner. I fossileldade kraftverk alstras entropin genom förbränning av fossila bränslen såsom olja eller kol. I kärnkraftverk uppstår entropin genom att atomkärnor av uran och plutonium klyvs.

När entropin lämnar kraftverket är temperaturen bara lite högre än omgivningstemperaturen. Entropin avges ofta till havsvattnet eller till en flod. Om detta inte räcker avges entropin till luften i stora kyltorn.

Förbränningsmotorer

Entropin alstras inne i motorn genom förbränning av bränslet – bensin eller dieselolja. Den lämnar motorn till största delen med avgaserna. Flödesschemat i figur 11.9 passar inte riktigt in på förbränningsmotorn, eftersom entropin inte tillförs utifrån.

Kolvångmaskiner

Innan el- och förbränningsmotorer slog igenom var kolvångmaskinerna de viktigaste drivmotorerna. De användes i ånglok och ångfartyg, i ångvältar och ångplogar, i ångtröskverk och för att driva maskiner i många fabriker.

Även här alstrades entropin i ångpanna genom förbränning av ett bränsle, ofta kol. Ångan släpptes sedan ut i luften och förde entropin med sig.

Jetmotorn

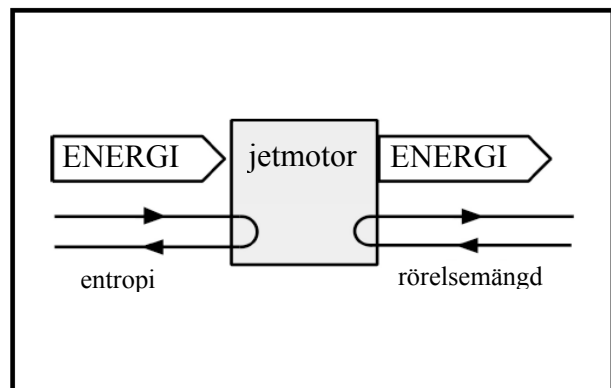


Fig 11.14. Energiflödesschema för en jetmotor

Jetmotorn används som drivmotor för de flesta stora trafikflygplanen. Den motsvarar inte helt

och hållet vår definition av en värmemotor. Energin avges inte över en roterande axel, utan med hjälp av reaktionskraften till flygplanet. (Den energibärare som strömmar här heter rörelsemängd. Jetmotorn ”pumpar” rörelsemängd från luften över till flygplanet.)

Som hos förbränningsmotorn alstras entropin genom förbränning av bränsle och lämnar jetmotorn med avgaserna.

Uppgifter

1. Genom en värmemotor flödar en entropiström med styrkan 100 Ct/s. Temperaturen vid ingången är 150 °C, vid utgången 50 °C. Hur mycket energi avger motorn per sekund över den roterande axeln?
2. Ett värmekraftverk avger med elektriciteten en energiström på 1,0 GW. Ångtemperaturen vid turbiningången är 750 K, vid utgången 310 K. Hur stor är entropiströmmen som följer med kylvattnet ut? Hur stor är energiströmmen som bärs av entropiströmmen?
3. Fundera på möjligheten att utnyttja naturligt förekommande entropi på hög temperatur. Diskutera även idéer som verkar orealistiska.

11.6 Energiförlust och verkningsgrad

På vägen från vattenkranen till munstycket i figur 11.15 förlorar man vatten. Ur vattenkranen kommer 2,0 liter per sekund, men till munstycket kommer bara 1,8 liter per sekund. Differensen på 0,2 liter per sekund har försvunnit genom hålet i slangen. Förlusten är alltså 0,2 liter per sekund. Vanligtvis uttrycks förlusten i procent av den ursprungliga mängden. Om vi betecknar förlusten med φ så är i det här fallet

$$\varphi = \frac{0,2 \text{ l/s}}{2,0 \text{ l/s}} = 0,1 = 10 \%$$

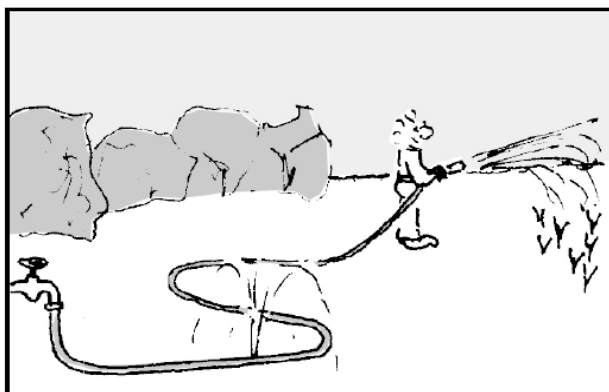


Fig 11.15. Genom hålet i slangen förlorar man vatten.

I nästan alla apparater som lastar om energin på en annan energibärare och i nästan alla ledningar som används för energiöverföring går energi förlorad. Vad menas med detta? Energi kan ju inte förintas! Det är som med vattnet i figur 11.15: En del av energin når inte dit den skall, den försvinner så att säga ut på sidan.

Energiförluster beror nästan alltid på att entropi alstras. Låt oss betrakta en vattenturbin. Hittills har vi ritat flödesschemat för vattenturbinen så som figur 11.16 (eller 11.10) visar. Detta är dock en ideal turbin, som inte existerar i verkligheten. För i varje real turbin alstras (oönskad) entropi på olika ställen: genom vattnets friktion mot rörväggarna, genom vattenpartiklarnas friktion mot varandra (”inre friktion”) och genom friktion i turbinaxelns lager. Den alstrade entropin lämnar turbinen på olika vägar: delvis följer den med vattnet, delvis går den ut i den omgivande luften.

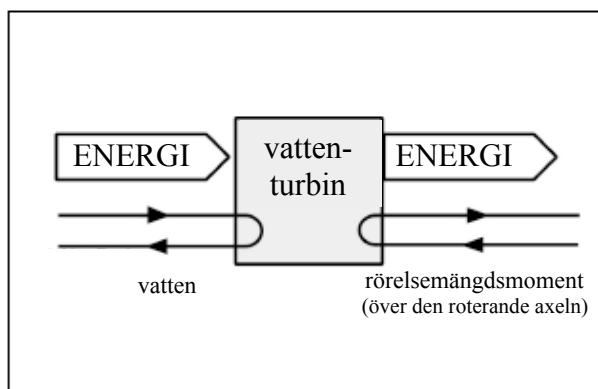


Fig 11.16. Energiflödesschema för en ideal vattenturbin

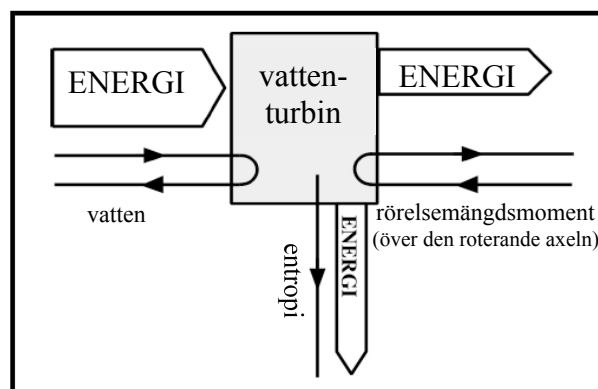


Fig 11.17. Energiflödesschema för en real vattenturbin.

Med denna entropi försvinner också en del av energin. Figur 11.17 visar energiflödesschemat för en real turbin. Energipilarnas bredd antyder storleksförhållandet mellan de olika strömmarna.

Om den förlorade energiströmstyrkan betecknas med P_φ så kan sambandet mellan den alstrade entropin $I_{S \text{ alstrad}}$ och den förlorade energin skrivas:

$$P_\varphi = T \cdot I_{S \text{ alstrad}}$$

och maskinens relativa energiförlust är

$$\varphi = \frac{P_\varphi}{P_{\text{tillförd}}} \quad (7)$$

där $P_{\text{tillförd}}$ är den tillförda energiströmmens styrka.

Ofta anger man verkningsgraden η i stället för energiförlusten. Om man betecknar den energiström som når ända fram, dvs som gör nytta, med P_{nyttig} så är

$$P_{\text{nyttig}} = P_{\text{tillförd}} - P_\varphi$$

och verkningsgraden kan skrivas

$$\eta = \frac{P_{\text{nyttig}}}{P_{\text{tillförd}}} = 1 - \varphi \quad (8)$$

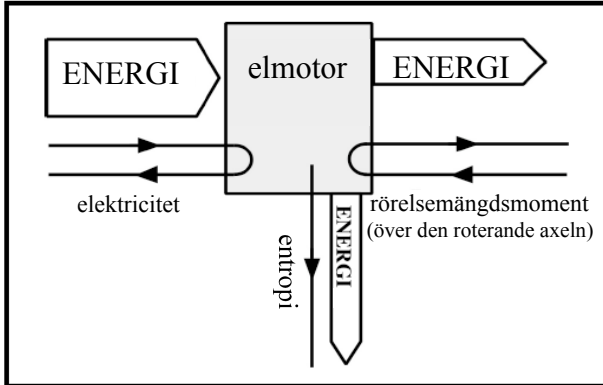


Fig 11.18 Energiflödesschema för en real elmotor

Figur 11.18 visar energiflödesschemat för en real, inte idealiserad elmotor. Även här alstras oönskad entropi. En del av entropin uppstår i ledningarna (när ström flyter genom en ledning alstras alltid entropi), en del i motorns lager.

Även energiförlusten respektive verkningsgraden i en vanlig elledning beräknas enligt formel (7) resp (8).

Som vi har sett beror energiförluster på att det alstras entropi. Naturligtvis vill man undvika dessa förluster. Kom därför ihåg:

Undvik entropialstring.

För många energiomlastare är förlusterna mycket höga. Tabell 11.1 anger några typiska värden.

Tabell 11.1 Energiförlust och verkningsgrad för några energiomlastare (typiska värden).

	Energiförlust _	Verkningsgrad _
Stor ångturbin	10 %	90 %
Stor elmotor	10 %	90 %
Leksaxelmotor	40 %	60 %
Solcell	90 %	10 %
Kolkraftverk	57 %	43 %
Kärnkraftverk	67 %	33 %
Vattenkraftverk	< 10 %	> 90 %

Förlusterna i värmekraftverken tycks vara mycket höga. Det är bara en mindre del av dessa som uppstår i ångturbinen och generatorm. Framför allt beror förlusterna på att det alstras entropi i eldningen respektive i reaktorn. Men kan man kalla det för energiförluster över huvud taget? Måste man inte alstra entropi för att kraftverket skall kunna fungera? Inte nödvändigtvis.

Apparater som lastar om energin direkt från bränslen till elektricitet kallas *bränsleceller*. En bränslecell fungerar på liknande sätt som ett batteri, där man dock hela tiden tillför det ämne som reagerar. Än så länge fungerar bränsleceller emellertid bara med mycket rena, gasformiga bränslen och inte med t ex kol. Dessutom är deras livslängd ännu inte tillräckligt stor för att de skall kunna konkurrera med vanliga kraftverk.

Uppgifter

1. En bilmotor avger 20 kW genom motoraxeln. Men det är bara 18 kW som når fram till hjulen på grund av friktion i växellådan och i lagren. Hur stor är energiförlusten respektive verkningsgraden?
2. En elmotor med verkningsgraden 60 % "drar" 10 W. Hur mycket energi avger den per sekund genom den roterande axeln? Hur mycket entropi alstras per sekund? Räkna med en omgivningstemperatur på 300 K.
3. En generator med verkningsgraden 92 % avger med elektriciteten en energiström med styrkan 46 kW. Hur stor är den energiström som flödar in i generatorm genom rotationsaxeln? Hur stor är den energiströmstyrka som går förlorad? Hur stor är den alstrade entropiströmmen (vid omgivningstemperaturen 300 K)?

11.7 Sambandet mellan entropi-innehåll och temperatur

Som vi hittills har sett ökar en kropps temperatur, när man tillför kroppen entropi. Vad beror temperaturökningen på, om kroppen tar emot en viss entropimängd?

För det första beror det på kroppens massa. Om två kroppar A och B består av samma material, men A har dubbelt så stor massa som B så tar A upp dubbelt så mycket entropi som B vid samma temperatur.

För det andra beror entropihalten också på vilket ämne föremålet består av. Figur 11.19 visar för två kroppar, den ena av koppar och den andra av aluminium, hur temperaturen ökar med entropihalten. Båda kropparna har massan 1 kg. Ur figuren framgår att det krävs mindre entropi att värma koppar än aluminium till en viss temperatur. Exempelvis innehåller kopparföremålet ca 500 Ct vid 300 K, medan aluminiumföremålet innehåller dubbelt så mycket, dvs 1000 Ct vid samma temperatur.

Å andra sidan kan man avläsa ur diagrammet att koppar värms upp mer än aluminium med en given entropimängd. Med 500 Ct uppnås temperaturen 300 K hos kopparföremålet, medan aluminiumföremålet bara kommer upp i 150 K.

För att visa vad som händer nära rumstemperaturen

är
figur
11.2
0

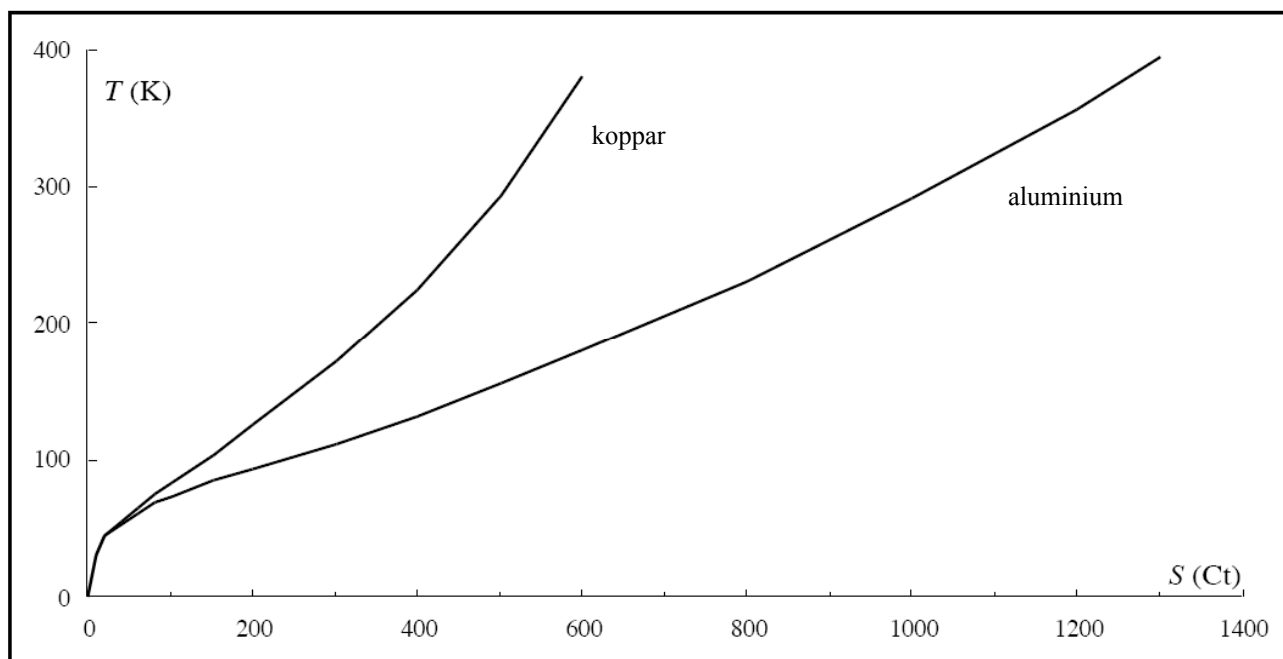


Fig 11.19. Temperaturen som funktion av entropihalten för 1 kg koppar och 1 kg aluminium.

mera lämpad. Den visar en förstörad del av diagrammet i figur 11.19 för följande ämnen: koppar, järn, aluminium, eldningsolja och vatten. Ju brantare kurvan är desto mindre entropi krävs för att åstadkomma en viss temperaturändring.

Uppgifter

1. Man tillför 1,0 kg koppar och 1,0 kg aluminium med utgångstemperaturen 25 °C entropin 80 Ct vardera. Beräkna temperaturförändringarna. Vilken metall värms upp mera? Hur många gånger mera?
2. Hur mycket entropi behövs för att värma 100 liter vatten från 20 °C till 100 °C? (1 liter vatten väger 1,0 kg.)

11.8 Sambandet mellan energitillförelse och temperaturändring

Om man vill hetta upp vatten måste man tillföra vattnet entropi. Men tillsammans med entropin tillförs vattnet också energi. Vi alla vet att det går åt energi för att värma vatten och att denna energi kostar pengar.

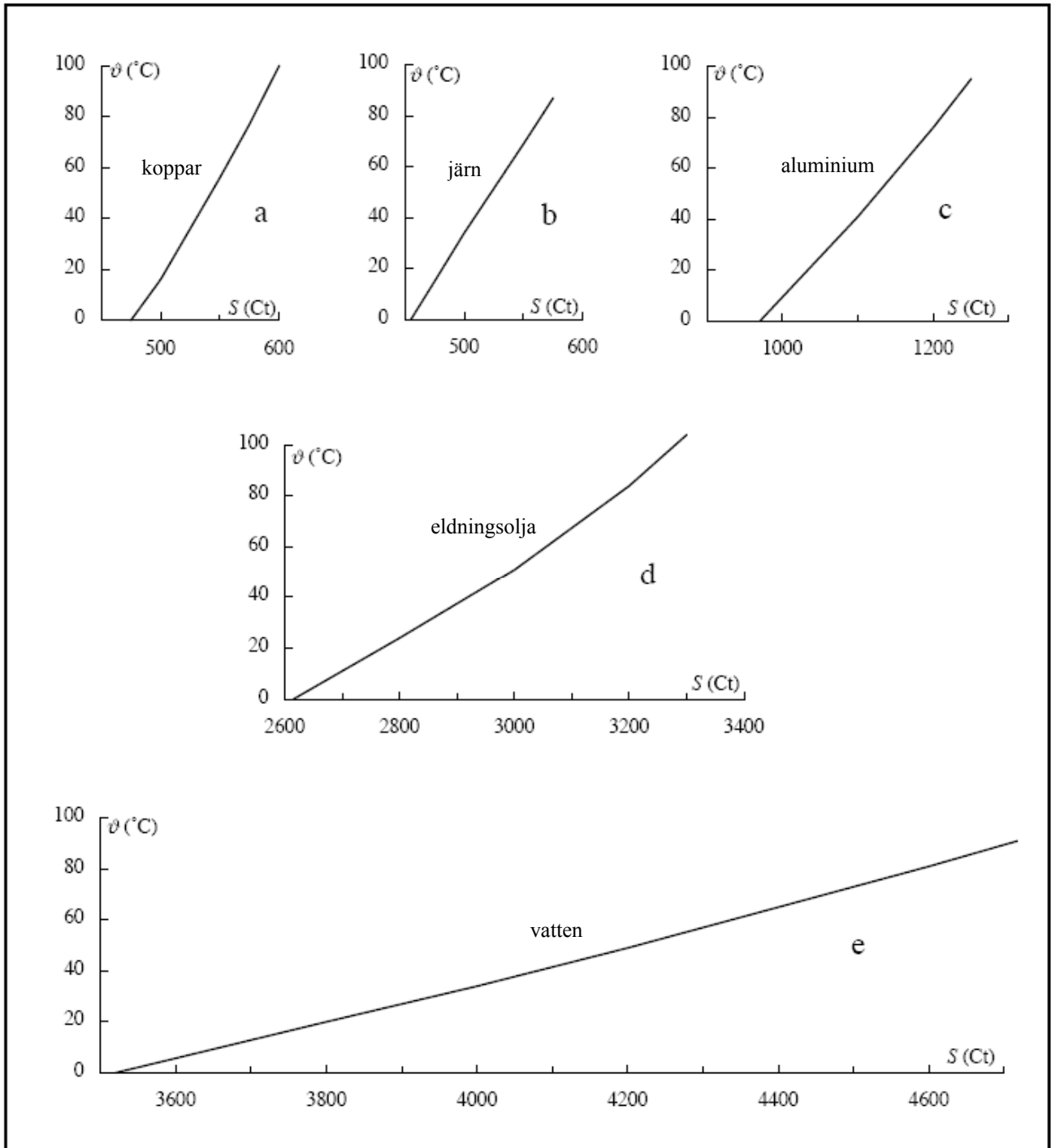


Fig 11.20. Temperaturen som funktion av entropihalten för 1 kg av följande ämnen: (a) koppar, (b) järn, (c) aluminium, (d) eldningsolja och (e) vatten. Lägg märke till att entropiskalan inte börjar med 0 Ct och att temperaturskalan (i °C) börjar vid 0 °C.

Vi skall nu härleda en formel för hur mycket energi som behövs för att värma vatten. För att värma 1 kg vatten från 20 °C till 100 °C behövs en viss energimängd. För att värma 2 kg vatten från 20 °C till 100 °C behövs naturligtvis dubbelt så mycket. Den tillförda energin \underline{E} är alltså proportionell mot massan m :

$$\underline{AE} \propto m$$

Dessutom beror den nödvändiga energin också på temperaturökningen. Vi tillför en viss mängd vatten energi med en doppvärmare (värmespiral) och mäter temperaturökningen \underline{T} som funktion av den tillförda energin \underline{E} . Experimentet visar att \underline{E} är proportionell mot \underline{T} :

$$\underline{AE} \propto \underline{AT}$$

Detta samband gäller inte för mycket höga eller mycket låga temperaturer, men mellan 0 °C och 100 °C stämmer det rätt så bra. Tillsammans med den förra proportionaliteten får man:

$$\Delta E \propto m \Delta T$$

För att göra om detta samband till en ekvation inför vi proportionalitetskonstanten c :

$$\Delta E = c \cdot m \cdot \Delta T$$

Konstanten c kallas ämnets specifika värmekapacitet. För att enheterna skall stämma måste c anges i J/(kg K).

Värdet på c beror på vilket ämne det föremål består av som man hettar upp eller kyler ner.

För vatten är den specifika värmekapaciteten $c = 4180 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K}) \approx 4,2 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$.

Uppgifter

1. En halv liter vatten skall hettas upp från 25 °C till 100 °C i en mikrovågsugn med effekten 500 W. Hur lång tid tar det? (1 liter vatten väger 1,0 kg.)
2. Hur mycket energi går det åt om man duschar varmt i 5,0 minuter? Anta att det rinner 6,0 liter vatten ur duschen per minut och att vattnet värms från 15 °C till 45 °C.

12. Fasövergångar

12.1 Fasövergångar

Vi håller en doppvärmare i en bägare med vatten, slår på strömmen genom doppvärmaren och mäter vattnets temperatur, se figur 12.1. Medan doppvärmaren avger entropi till vattnet ökar temperaturen till en början. Men då vattentemperaturen nått upp till 100 °C börjar vattnet koka och temperaturen ökar inte längre, fastän doppvärmaren fortsätter avge entropi till vattnet. Varför är det så?

När vattnet kokar övergår flytande vatten till gasformigt vatten, till *vattenånga*. Vattenångan har samma temperatur som det flytande vattnet när det kokar, dvs 100 °C. Den entropi som tillförs vattnet används nu till att förångas vattnet. Vattenånga innehåller alltså mer entropi än flytande vatten.

Ångan kan hettas upp ytterligare genom att den leds genom ett rör som hettas upp utifrån, se figur 12.2.

Figur 12.3 visar temperaturen för 1 kg vatten som funktion av vattnets entropihalt. Ur grafen avläser man att 1 kg vattenånga innehåller ca 6000 Ct mer än 1 kg flytande vatten.

Entropihalten hos 1 kg 100-gradig vattenånga är ca 6000 Ct större än entropihalten hos 1 kg 100-gradigt flytande vatten.

Ur diagrammet framgår också att något liknande sker vid övergången från fast till flytande form. Flytande vatten av temperaturen 0 °C innehåller ca 1200 Ct mer entropi än fast vatten, dvs is av samma temperatur. För att smälta 1 kg nollgradig is till 1 kg flytande nollgradigt vatten måste man tillföra entropimängden 1200 Ct. Omvänt gäller: För att omvandla 1 kg flytande vatten av temperaturen 0 °C till 1 kg nollgradig is måste 1200 Ct föras bort.

Entropihalten hos 1 kg flytande nollgradigt vatten är ca 1200 Ct större än entropihalten hos 1 kg nollgradig is.

Man brukar tala om att ett ämne uppträder i olika tillstånd eller faser. Vatten förekommer i

tre olika faser: fast, flytande och gasformig. Den gasformiga fasen kallas även ånga. Även för fasövergångarna finns det bestämda uttryck:

fast form → flytande form: smältning
flytande form → fast form: stelning eller frysning

flytande form → gasform: ångbildning
gasform → flytande form: kondensation

Även andra ämnen än vatten uppträder i olika faser. Exempelvis kan metaller både smältas och förångas. I tabell 12.1 anges smält- och ångbildningstemperaturen för några ämnen.

Det finns fler än de tre faserna ”fast”, ”flytande” och ”gasformig”. Det är vanligt att ett ämne har flera olika fasta faser, som skiljer sig i många avseenden. Många ämnen har också flera flytande faser med olika egenskaper.

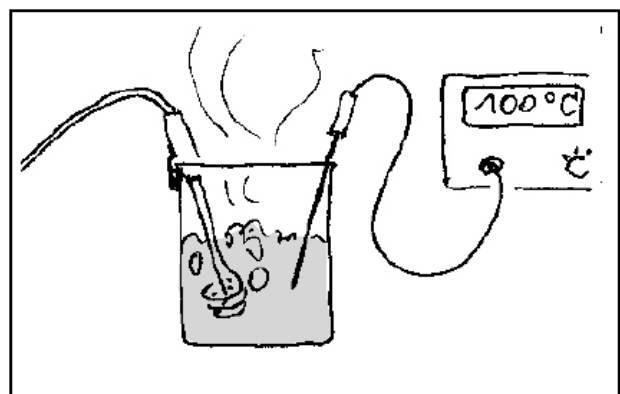


Fig 12.1. Trots fortsatt entropitillförsel upphör vattentemperaturen att öka vid 100 °C.

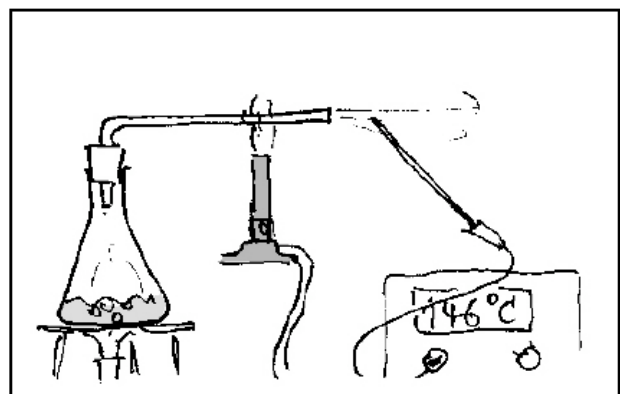


Fig 12.2. Vattenångan som från början har temperaturen 100 °C hettas upp ytterligare.

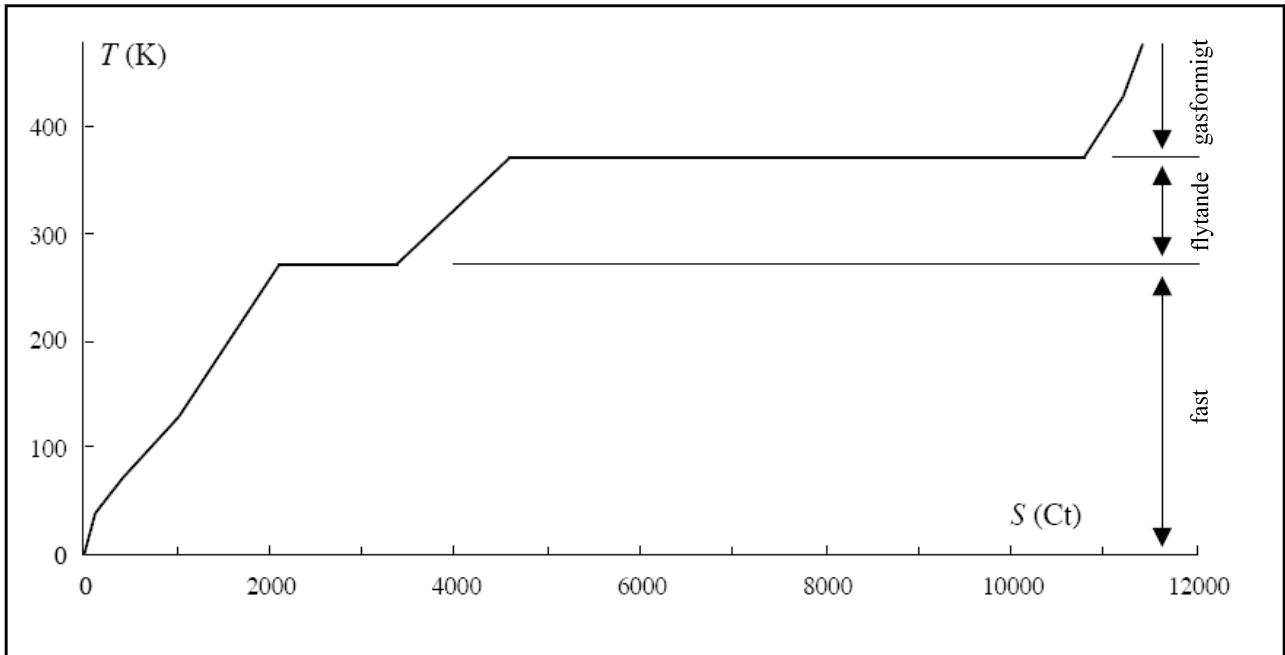


Fig 12.3 Temperaturen som funktion av entropihalten för 1 kg vatten vid normalt lufttryck ($p = 1$ bar).

Uppgifter

1. Avläs ur diagrammet i fig 12.3 hur mycket entropi som 1 kg 100-gradig vattenånga respektive 1 kg 100-gradigt flytande vatten innehåller. Hur många gånger större är värdet för vattenånga än för flytande vatten?
2. Hur mycket entropi behövs för att omvandla 10 liter flytande vatten av temperaturen 90 °C till ånga av temperaturen 100 °C?
3. För att smälta en nollgradig iskloss behövs 6000 Ct. Beräkna isklossens massa.
4. 250 ml läsk (vatten) kyls med istärningar från 20 °C till 0 °C. Hur mycket is smälter vid denna process?
5. I en espressomaskin värmer 100-gradig ånga 0,20 liter mjölk (vatten) från 15 ° till 60 °C. Hur mycket ånga behövs det?

12.2 Ångbildning och avdunstning

Vi vet redan att vatten kokar vid 100 °C. Men det kan övergå till gasform redan vid lägre tem-

Tabell 12.1. Några smält- och kokpunkter

	Smältpunkt (°C)	Kokpunkt (°C)
Aluminium	660	2450
Koppar	1083	2590
Järn	1535	2880
Vatten	0	100
Etanol	-114,5	78,3
Syre	-218,8	-183
Kväve	-210	-195,8
Väte	-259,2	-252,2

peratur, bara långsammare. I det här fallet brukar man tala om "avdunstning".

Varför sker denna avdunstning långsammare än ångbildningen vid kokpunkten? Vari ligger skillnaden i de båda fallen? Se figur 12.4, som visar en vattenyta vid olika temperaturer. Vid 20 °C finns direkt ovanför vattenytan luft med bara en liten del vattenånga. För att avdunstning skall kunna ske måste denna vattenånga försvinna uppåt, dit där luften innehåller mindre vattenånga. En process vid vilken en gas (i det här fallet ånga) måste "tränga sig" igenom en annan gas (här luft) kallas *diffusion*. Den andra gasen gör då motstånd mot den första gasens rörelse. I det här fallet betyder det att vattenången har svårt att ta sig bort från vattenytan.

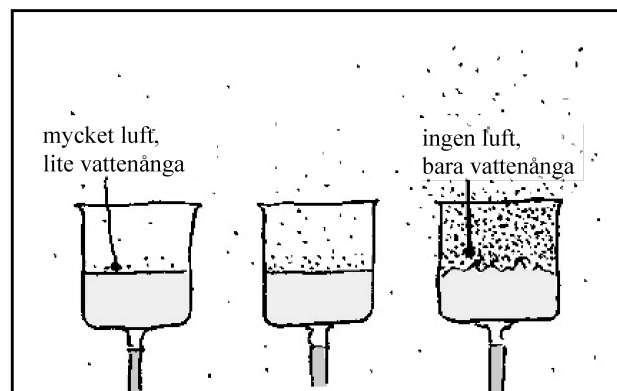


Fig 12.4. När vattnet kokar trycker vattenången bort all luft direkt ovanför vattenytan.

Vid den högre temperaturen befinner sig mer vattenånga över vattenytan. Detta påskyndar diffusionen och vattenången försvinner snabbare. Därför går även avdunstningen fortare. Vid 100 °C finns det bara vattenånga direkt ovanför vattenytan. För att denna skall kunna försvinna bort från vattenytan behöver den inte längre diffundera genom luften utan kan strömma fritt. Vattenången försvinner nu så fort som det flytande vattnet kan leverera ny vattenånga och som vattnet i sin tur får den entropi som behövs för ångbildningen.

Det förklarar ett intressant fenomen: Är lufttrycket mindre än normaltrycket 1 bar kokar vatten vid en temperatur som är lägre än 100 °C. För om lufttrycket är lägre kan den ånga som kommer från vattenytan tränga undan luften tidigare, dvs vid lägre temperatur.

Detta fenomen kan observeras på toppen av höga berg. Där är lufttrycket lägre och därmed vattnets kokpunkt lägre än 100 °C. På 5400 m höjd är lufttrycket ca 0,5 bar och vattnets kokpunkt ca 83 °C.

12.3 Fasövergångar i natur och teknik

Vid en fasövergång tar ett ämne (vid oförändrad temperatur) upp eller avger entropi beroende på åt vilket håll fasövergången sker. Detta fenomen har många användningar i tekniken och förklarar några intressanta händelser i naturen.

Avdunstningskylan

När du kommit upp ur en simbassäng fryser du lätt, särskilt om luften omkring dig rör sig. Vattnet på din hud avdunstar. Till detta behövs entropi, som tas från din kropp. Avdunstningen sker särskilt snabbt, om det redan avdunstade vattnet förs bort av luftströmmen.

Het ånga är farligare än hett vatten

Det är inte alls lika allvarligt om du får lite hundrigradigt vatten på ditt finger som när du får hundrigradig ånga på det. I båda fallen överförs entropi på fingret, som kan leda till brännskador. Men med ångan är faran mycket större, eftersom ångan kondenserar på fingret och då

avger en mycket stor extra entropimängd till det.

Köldblandningar

Saltvatten har en lägre smältpunkt än vanligt rent vatten. Vi fyller små bitar sönderslagen is (eller snö) i ett glas och mäter dess temperatur. Den är som väntat 0 °C. Om vi nu tillsätter en större mängd koksalt och rör om sjunker temperaturen till under -10 °C.

Genom det tillsatta saltet sjunker smältpunkten. En del av isen smälter. Till detta behövs det entropi. Eftersom det inte tillförs någon entropi utifrån kyls is-vatten-blandningen ner. Isen fortsätter att smälta och temperaturen sjunker ytterligare, tills den slutligen når den nya smältpunkten. Då avstannar processen.

Entropireservoarer

Man kan lagra entropi genom att värma ett föremål. Släpper man ut entropin igen ur föremålet så kyls det ner igen. Denna metod används i en speciell ugnstyp, som visas i figur 12.5. En sådan ugn består till stor del av keramikstenar. På natten, när energin är billigare, laddas stenarna med entropi. De värms då till över 600 °C. På dagen hämtar man ut entropin igen genom att blåsa luft förbi stenarna.

Helst skulle man vilja lagra den entropi som finns i stor mängd på sommaren ända till vintern. Då kan inte denna ugnstyp användas, eftersom det inte är särskilt mycket entropi som kan lagras i stenarna.

En mera lovande metod utnyttjar en fasövergång. Man väljer ett ämne som övergår från fast

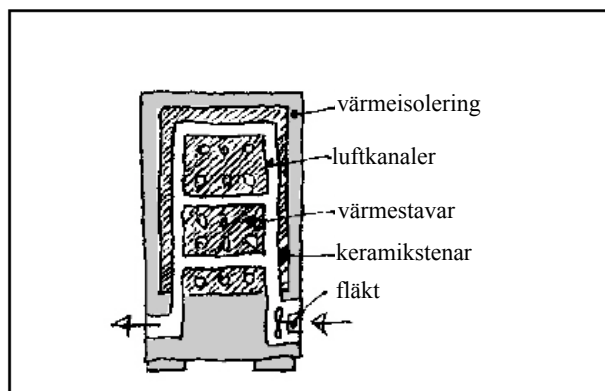


Fig 12.5. Ugn för entropilagring

till flytande form vid en lämplig temperatur (ca 50 °C). På sommaren smälter man en stor mängd av ämnet med hjälp av solentropi och -energi. På vintern tar man ut entropin igen för att värma upp hus.

Om energipriserna ökar kraftigt i framtiden kan denna metod att utnyttja solenergin bli konkurrenskraftig.

Kylning av drycker med is

För att kyla en dricka kan man ställa den i kylskåpet. Dess värmepump pumpar ut entropi ur drickan. Men ofta vill man kyla drickan när den står på bordet. Då brukar man lägga i några isbitar. Varför tar man inte bara lite kallt vatten i stället? Effekten skulle bli mycket mindre. När isen smälter tas entropin från drickan. Om det finns tillräckligt mycket is fortsätter smältningen tills drickans temperatur är 0 °C.

Flytande kväve

Om man vill kyla något till mycket låg temperatur, men inte förfogar över ett lämpligt kylaggregat, kan man använda flytande kväve som man kan köpa billigt.

Kvävets kokpunkt är 77 K (−196 °C). Men hur kan kväve hålla sig flytande då omgivningstemperaturen är mycket högre? Kvävet förvaras i välisolerade kärl. Den lilla entropimängd som tar sig genom isoleringen orsakar att kvävet kokar svagt hela tiden. Det kvarvarande kvävet temperatur hålls konstant på 77 K på samma sätt som kokande vatten bibehåller sin temperatur på 100 °C. Därför kan flytande kväve förvaras i flera dagar.

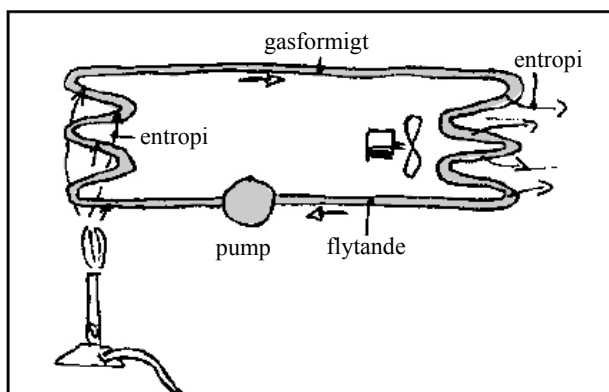


Fig 12.6. Till vänster förångas kväve, varvid det tar upp mycket entropi. Entropin avges igen vid kondensationen till höger.

Entropitransport med fasövergångar

Tidigare har vi sett att entropitransport genom konvektion är mycket effektivare än genom värmeledning. Det finns ytterligare ett transportsätt som fungerar bättre än den vanliga konvektionen, se figur 12.6. Ämnet i rören förångas på vänster sida, vid entropikällan. Härvid tar det upp mycket entropi. Det strömmar sedan genom den övre ledningen mot höger. I den högra rörslingan kondenserar det och avger då den förut upptagna entropin igen. Förre fanns det vissa centralvärmeanläggningar som fungerade enligt denna princip, så kallade ångvärmesystem. De hade dock några nackdelar: De var svåra att reglera och genom ångans kondensation uppstod obehagliga ljud i elementen.

Idag används metoden framför allt med värmepumpar, till exempel i kylskåp. I rörslingan i kylskåpets inre förångas köldmedlet och tar upp entropi. I rörsystemet på utsidan kondenserar det och avger då entropi. (För att köldmedlet skall kondensera på det varmare stället och förångas vid det kallare måste trycket vara högre på det varmare stället, vilket man åstadkommer med hjälp av en kompressor.)

Även i naturen spelar denna typ av entropitransport en stor roll. I atmosfären pågår ständigt ångbildning och kondensation. Där vatten förångas blir det kallare. Vattenångan för med luften till en annan plats där den kondenserar. Där blir det varmare.

12.4 Sambandet mellan energitillförseln och entropin vid fasövergångar¹

Ofta vill man veta hur mycket energi som behövs för att smälta ett fast ämne eller överföra ett flytande ämne i gasform.

Som vi har sett tidigare behövs det entropi för att en fasövergång skall kunna ske. Med entropiströmmen I_S följer alltid en energiström P enligt det samband som härleddes i kapitel 11.2:

$$P = T \cdot I_S$$

¹ Detta avsnitt ingår inte i "Karlsruher Physikkurs" utan är en anpassning till den svenska kursplanen för fysik A.

I det här fallet är T den absoluta temperaturen vid fasövergången, dvs ämnets smält- respektive kokpunkt.

När entropi- och energitillförseln har pågått under en viss tid t så kan man lätt beräkna energibehovet för att smälta 1 kg av ett ämne:

$$\dot{A}E = P \cdot \dot{A}t = T \cdot \dot{A}S$$

För att smälta exempelvis 1 kg is behövs entropin $\dot{A}S \approx 1,2 \cdot 10^3$ Ct. Eftersom isens smältpunkt är 273 K är den nödvändiga energin

$$\dot{A}E = 273 \text{ K} \cdot 1,2 \cdot 10^3 \text{ Ct} \approx 3,3 \cdot 10^5 \text{ J} = 0,33 \text{ MJ}$$

I formelsamlingen finns motsvarande värde för ett antal olika ämnen under namnet smältentalpitet eller specifik smältentalpi. Smältentalpiten betecknas med symbolen c_s och anges vanligen i kJ/kg. Ett noggrannare värde för is/vatten är 334 kJ/kg.

Därmed får vi ett enklare samband för att beräkna energibehovet för att smälta en viss mängd (massa m) av ett ämne:

$$\dot{A}E = c_s \cdot m$$

På samma sätt kan vi bestämma ångbildningsentalpiten (den specifika ångbildningsentalpin):

$$\dot{A}E = c_a \cdot m$$

Eftersom man måste tillföra drygt $6,0 \cdot 10^3$ Ct för att överföra 1 kg flytande vatten till vattenånga och vattnets kokpunkt är 373 K så går det åt

$$\dot{A}E = 373 \text{ K} \cdot 6,0 \cdot 10^3 \text{ Ct} \approx 2,3 \cdot 10^6 \text{ J} = 2,3 \text{ MJ}$$

(Värdet är avrundat uppåt.)

Ett noggrannare värde för vattnets ångbildningsentalpitet finns i formelsamlingen:

$$c_a = 2260 \text{ kJ/kg}$$

Uppgifter

1. En kokplatta med märkningen 1,2 kW används för att smälta 0,30 kg nollgradig is. Utgå ifrån att hela den alstrade entropin och den omsatta energin överförs till isen.

- Hur stor är den entropiström som överförs till isen?
- Hur mycket energi behövs för att smälta isen?
- Hur lång tid tar det att smälta isen?

2. För att laga en mustig grönsakssoppa måste den småkoka i en timme. Under denna tid övergår 3,0 dl vatten till ånga.

- Hur stor är den energiström (= effekt) som måste tillföras soppan för att hålla den kokande? Bortse från övriga energiförluster till omgivningen.
- Hur mycket entropi har gått över till ångan under en timme?

13. Gaser

13.1 Gaser och kondenserade ämnen

Ämnen kan vara fasta, flytande eller gasformiga.

Den flytande och den gasformiga fasen har något gemensamt: Både flytande och gasformiga ämnen kan strömma. När det blåser en vind eller när det går en fläkt eller hårtork strömmar luft. Vatten strömmar i älvar, bäckar och i havet och sjölvfallet också när man öppnar vattenkranen. Eftersom strömmar av vätskor och gaser har mycket gemensamt betecknas vätskor och gaser ofta med det gemensamma namnet *fluider*. Fluider är med andra ord motsatsen till fasta ämnen.

Å andra sidan har fasta ämnen gemensamheter med vätskor, som skiljer dem från gaserna. Fasta och flytande ämnen har mycket högre densitet än gaser. Även fasta och flytande ämnen kan alltså sammanföras till en gemensam klass. Dessa ämnen kallas *kondenserade ämnen*. Kondenserade ämnen är motsatsen till gaserna, se figur 13.1.

I fortsättningen kommer vi att undersöka flera egenskaper där gaser och kondenserade ämnen skiljer sig från varandra.

Strävan att bre ut sig

Vi pumpar ut luften ur en glasbehållare och låter lite vatten rinna in, se figur 13.2. Vattnet faller neråt precis som i en luftfylld behållare.

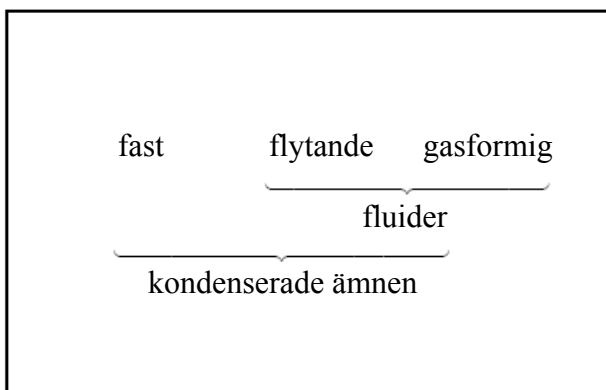


Fig 13.1 Två klassindelningar av ämnena

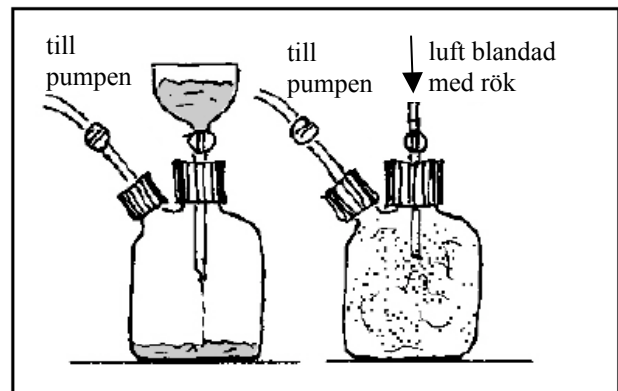


Fig 13.2. Gaser fyller hela det utrymme som står till förfogande, vätskor inte.

Vi upprepar försöket, men släpper in luft i behållaren i stället för vatten. Luften uppblandas med lite rök så att man lättare kan se hur luften beter sig. Försöket visar:

Gaser fyller hela det utrymme som står till förfogande, kondenserade ämnen inte.

Denna mening innebär en liten förenkling. Den gäller för det mesta, men inte alltid. Exempelvis hålls jordens atmosfär kvar nära jordytan i stället för att försvinna ut i rymden. Varför är det så?

Kompressibiliteten

Ett cylindriskt kärl med förskjutbar kolv är fyllt med luft. Trycker man in kolven i cylindern komprimeras luften, se figur 13.3a. Om cylindern är fylld med vatten i stället (figur 13.3b) kan kolven inte tryckas inåt. Vatten kan (nästan) inte komprimeras.

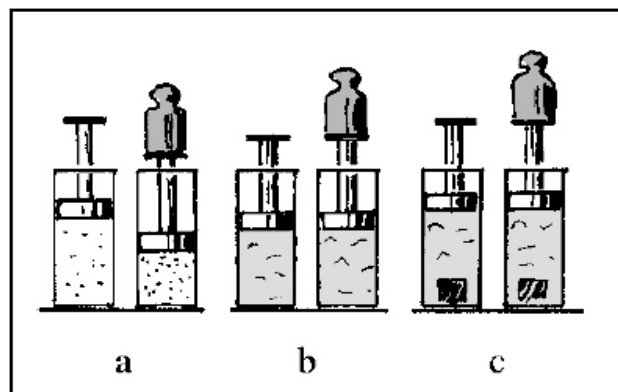


Fig 13.3. Gaser (a) kan komprimeras, vätskor (b) och fasta ämnen (c) inte.

Även om man lägger ett fast ämne i kolven tillsammans med vattnet (figur 13.3c) kan kolven inte tryckas in i cylindern. Inte heller fasta ämnen kan komprimeras (mer än ytterst lite). Skumplaster verkar visserligen vara komprimerbara, men det som trycks ihop är inte det fasta ämnet utan luften i ämnets porer.

Sammanfattningsvis kan vi säga:

Gaser kan komprimeras, kondenserade ämnen inte.

Kompression betyder att man minskar volymen V hos en viss mängd av ett ämne, varvid massan m förblir oförändrad. Ur formeln för densiteten $\rho = m/V$ framgår att densiteten ökar då ämnet komprimeras. För ett icke komprimerbart ämne gäller detta inte:

Gasers densitet ökar då trycket ökar, medan kondenserade ämnens densitet förblir (nästan) oförändrad.

En intressant konsekvens är att vattnets densitet i en sjö inte ökar nämnvärt på större djup, fastän trycket ökar. Densiteten är överallt densamma, ca 1000 kg/m^3 . För luften ovanför jordytan är situationen helt annorlunda. Trycket minskar med höjden över havet och därmed också luftens densitet. Därför blir det allt jobbigare att andas när man klättrar på ett högt berg.

Den termiska expansionen

Gaser och kondenserade ämnen reagerar också olika när man tillför entropi till dem.

Hettar man upp ett fast ämne så ändras dess volym ganska lite. Samma sak gäller för vätskor. Gaser däremot betar sig helt annorlunda.

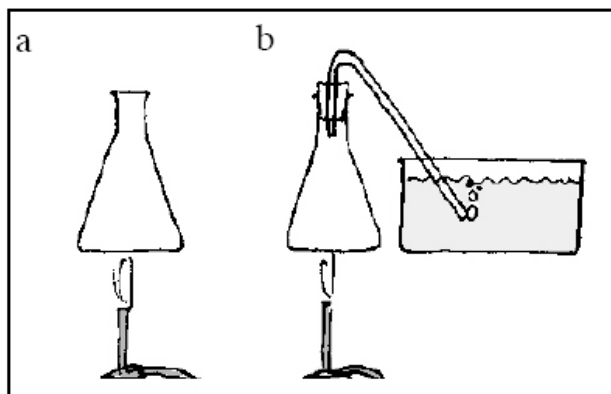


Fig 13.4. Gaser expanderar vid entropitillförel. Anordningen till höger gör det möjligt att se luften "rinna över".

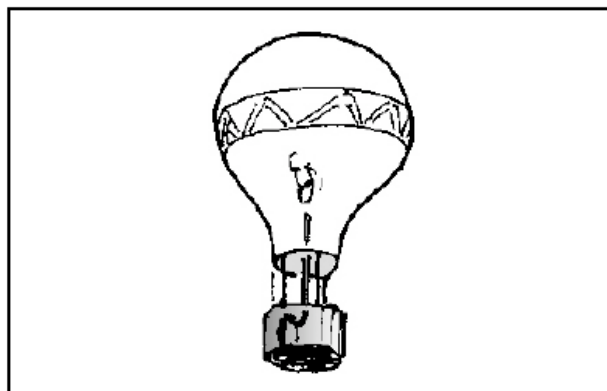


Fig 13.5. Varmluftsbaljong (till uppgift 2)

Värmer man luften i en behållare som är öppen uppåt (figur 13.4a) expanderar den och "rinner över". Eftersom luft är osynlig kan man inte se det, men med hjälp av ett litet trick kan man visa det (figur 13.4b).

Gaser expanderar vid entropitillförel, kondenserade ämnen nästan inte.

Uppgifter

1. Varför har cyklar luftfyllda däck? Varför fyller man dem inte med vatten?
2. I figur 13.5 visas en varmluftsbaljong. Ballongen är öppen nertill. Luften i ballongen värms upp med hjälp av en gaslåga. Varför stiger ballongen uppåt?

13.2 Gasernas termiska egenskaper

I förra avsnittet jämförde vi gaser och kondenserade ämnen med varandra. I fortsättningen kommer vi bara att syssla med gaser. Deras termiska egenskaper är mycket intressantare än de kondenserade ämnenas.

Vi stänger in en gas i en behållare med fast volym för att hindra den från att expandera och tillför gasen entropi, se figur 13.6. En ansluten manometer visar att trycket växer under entropitillföreln. Tillsammans med iakttagelsen från förra avsnittet kan vi sammanfatta:

Om en gas tillförel entropi vid konstant tryck ökar dess volym.

Om en gas tillförel entropi vid konstant volym ökar dess tryck.

I båda fallen ökar också gasens temperatur.

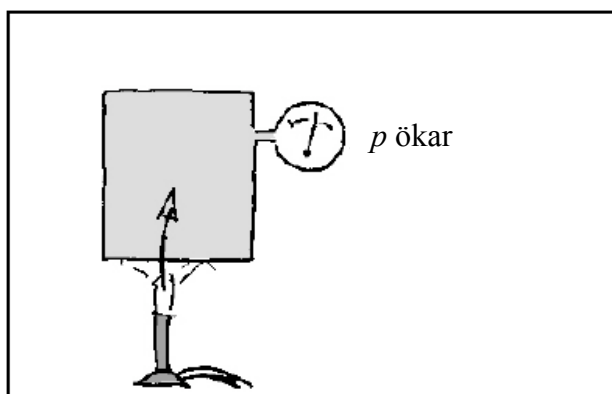


Fig 13.6. Om en gas tillförs entropi vid konstant volym ökar dess tryck.

Båda dessa förlopp kan beskrivas symboliskt genom att man anger för var och en av de fyra storheterna entropi S , temperatur T , volym V och tryck p om den förblir konstant, ökar eller minskar:

$$S \uparrow \quad T \uparrow \quad V \uparrow \quad p = \text{konstant} \quad (1)$$

$$S \uparrow \quad T \uparrow \quad V = \text{konstant} \quad p \uparrow \quad (2)$$

Vi trycker än en gång ihop luften i en cylinder, men mäter temperaturen denna gång, se figur 13.7. Vi konstaterar att temperaturen stiger vid kompressionen. Minskar man lufttrycket så sjunker temperaturen igen.

Detta fenomen är i grund och botten ganska enkelt att förstå: Vid kompressionen trycks också den entropi som luften innehåller ihop, den koncentreras till ett mindre utrymme. Mycket entropi i ett litet utrymme betyder alltså hög temperatur.

Minskar man volymen hos en gas så ökar gasens temperatur.

Uttryckt i symboler betyder det:

$$S = \text{konstant} \quad T \uparrow \quad V \downarrow \quad p \uparrow \quad (3)$$

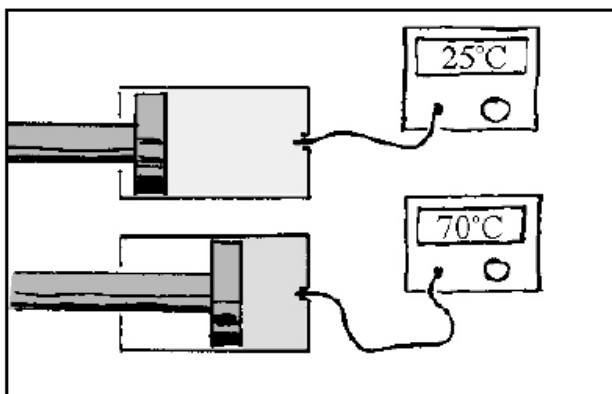


Fig 13.7. Vid komprimering ökar gasens temperatur.

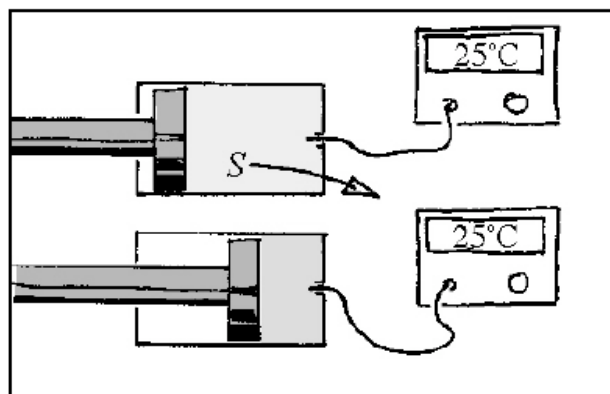


Fig 13.8. Om man skjuter in kolven mycket långsamt in i cylindern strömmar entropi bort från gasen ut i omgivningen.

Raderna (1) till (3) beskriver tre olika förlopp som kan inträffa med gaser. Självfallet gäller även den omvända situationen i vart och ett av fallen. Den omvända händelsen till (1) är exempelvis:

$$S \downarrow \quad T \downarrow \quad V \downarrow \quad p = \text{konstant}$$

Vid vart och ett av förloppen (1) till (3) hålls en annan storhet konstant, vid (1) trycket, vid (2) volymen och vid (3) entropin. Nu fattas det bara en process då temperaturen förblir konstant. För att åstadkomma det räcker det att komprimera gasen i figur 13.7 mycket långsamt, se figur 13.8. Egentligen borde kompressionen orsaka en temperaturökning, men om gasen trycks ihop sakta kan gasens temperatur hela tiden jämnas ut med omgivningen. Därvid strömmar entropi från gasen ut i omgivningen, med andra ord: I slutändan innehåller gasen mindre entropi än innan. Uttryckt med symboler betyder detta:

$$S \downarrow \quad T = \text{konstant} \quad V \downarrow \quad p \uparrow \quad (4)$$

Även denna rad är intressant. Den passar nämligen ihop med en tidigare erfarenhet: Ju större volym en viss mängd av ett ämne har (vid konstant massa och temperatur) desto mer entropi innehåller den. Detta fenomen spelade roll vid fasövergången från flytande form till gasform. Gasen (med stor volym) innehåller vid samma temperatur mer entropi än vätskan (med liten volym).

I figur 13.9 sammanfattas processerna (1) till (4) tillsammans med deras omvända händelser.

$S \uparrow$	$T \uparrow$	$V \uparrow$	$p = \text{konstant}$	(1a)
$S \downarrow$	$T \downarrow$	$V \downarrow$	$p = \text{konstant}$	(1b)
$S \uparrow$	$T \uparrow$	$V = \text{konstant}$	$p \uparrow$	(2a)
$S \downarrow$	$T \downarrow$	$V = \text{konstant}$	$p \downarrow$	(2b)
$S = \text{konstant}$	$T \uparrow$	$V \downarrow$	$p \uparrow$	(3a)
$S = \text{konstant}$	$T \downarrow$	$V \uparrow$	$p \downarrow$	(3b)
$S \downarrow$	$T = \text{konstant}$	$V \downarrow$	$p \uparrow$	(4a)
$S \uparrow$	$T = \text{konstant}$	$V \uparrow$	$p \downarrow$	(4b)

Fig 13.9. Symbolisk beskrivning av fyra processer. Vid var och en av dessa hålls en av storheterna S , T , V eller p konstant.

Uppgifter

1. Du behöver: en flaska med tättslutande lock och två skålar med hett respektive kallt vatten.

a) Luften i den öppna flaskan kyls med hjälp av det kalla vattnet. Flaskan stängs och hålls ner under ytan i det varma vattnet. Flaskans lock öppnas en aning så att det inte längre är tätt. Vad händer? Förklaring?

b) Luften i den öppna flaskan värms upp med hjälp av det varma vattnet. Flaskan stängs och hålls under ytan i det kalla vattnet. Flaskans lock öppnas en aning. Vad händer? Förklaring?

2. Två behållare innehåller lika mycket av samma gas vid samma temperatur. Båda gaserna tillförs samma entropimängd. I den första behållaren hålls volymen konstant, i den andra trycket. Är temperaturändringarna i båda gaserna desamma? Om nej, i vilken gas är temperaturändringen större? Ökar eller minskar temperaturen? Motivera!

3. Hur kan man uppnå att temperaturen hos en gas minskar, fastän man tillför gasen entropi?

13.3 Värmemotorers funktionssätt

I avsnitt 11.4 konstaterade vi att entropin i en värmemotor går från hög temperatur till låg temperatur, varvid den ”driver” någonting, på samma sätt som när vattnet i en vattenturbin går från högt till lågt tryck och driver någonting.

Hur kan man få entropi att gå från hög temperatur till låg temperatur så att man kan driva någonting med den?

Att få entropi att gå från hög till låg temperatur utan att den driver någonting är inget problem. Det händer för det mesta av sig självt. Det

räcker att entropin går från hög temperatur till låg temperatur genom en värmeledare (se även avsnitt 11.3). Men då förloras också energin tillsammans med den alstrade entropin i stället för att omlastas till en användbar energibärare (till exempel rörelsemängdsmomentet i en roterande axel). Energin har slösats bort.

Hur kan man då få entropi att gå från hög till låg temperatur utan att det alstras mera entropi? Figur 13.10 visar hur det går till.

Entropin transporteras in i en komprimerad gas, som därefter får expandera igen. Enligt rad (3b) i figur 13.9 minskar då temperaturen, samtidigt som kolven trycks utåt. Den energi som lastas av från entropin förs bort med kolvstängan, exempelvis till en vev som försätter en axel i rotation.

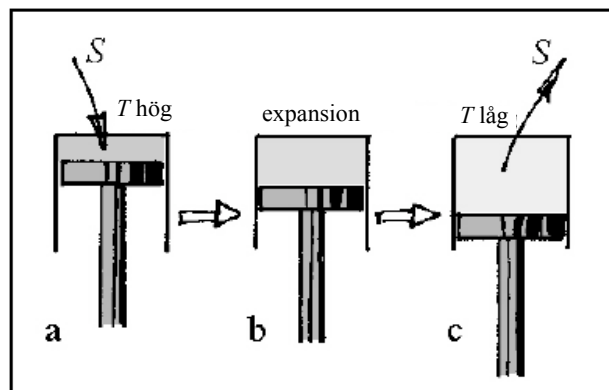


Fig 13.10. Värmemotorers funktionssätt.

a) Entropin transporteras in i en komprimerad gas.

b) Gasen expanderar. Därvid sjunker dess temperatur och den avger energi.

c) Entropin avges igen vid låg temperatur.

I en värmemotor får man en gas att expandera. Då minskar gasens tryck och temperatur och gasen avger energi.

Detta är grundprincipen för alla värmemotorer. Det finns ett stort antal tekniska användningar av denna idé: kolvångmaskinen, ångturbinen, ottomotorn, dieselmotorn, jetmotorn osv.

Två av dessa maskiner kommer vi att studera närmare: kolvångmaskinen, eftersom den spelade en viktig historisk roll och ottomotorn, eftersom den sitter i de flesta av dagens bilar.

Kolvångmaskinen

Största problemet vid förverkligandet av en maskin som arbetar enligt principen i fig 13.10

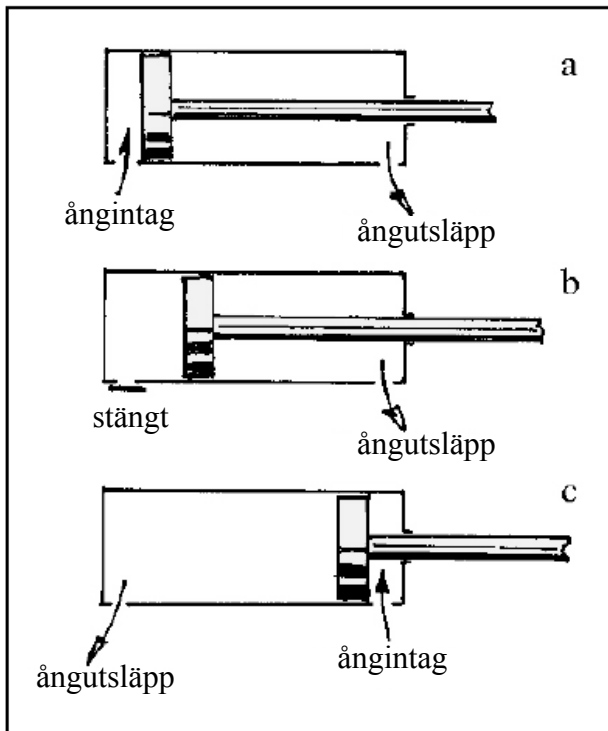


Fig 13.11. Kolvångmaskinen vid tre olika tidpunkter

är att *snabbt* få in entropin i maskinen och *snabbt* få ut den igen. Att använda värmeledning in i arbetscyllindern skulle gå alldeles för sakta. I stället använder man konvektion, som går tillräckligt fort.

Gasen hettas upp utanför cylindern och leds sedan in i cylindern tillsammans med sin entropi. Där expanderar den, samtidigt som den avger energi till kolven. Sedan strömmar gasen tillsammans med sin entropi ut ur cylindern igen.

Figur 13.11 visar i detalj hur detta fungerar hos ångmaskinen. Som arbetsgas använder man vattenånga. Ångan alstras i ångpannan och hettas dessutom upp efteråt. *Slidregleringen* styr intaget och utsläppet av ångan. Från början befinner sig kolven längst till vänster, detaljbild a. Från vänster strömmar färsk ånga in i cylinderns vänstra del. När kolven har rört sig lite grann åt höger, detaljbild b, stänger slidregleringen ångintaget. Ångan trycker kolven längre åt höger och expanderar, dess tryck och temperatur minskar. Kolven når nu högra vändpunkten, detaljbild c, och börjar röra sig tillbaka. Slidregleringen har under tiden öppnat utsläp-

pet. Den expanderade, nerkylda ångan trycks tillsammans med sin entropi ut i omgivningen.

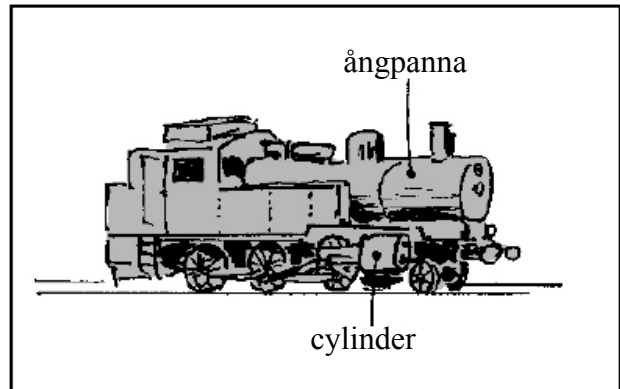


Fig 13.12. Ånglok

Samma sak sker på kolvens högra sida. Ångan på den högra sidan trycker kolven åt vänster.

Ångmaskinens olika delar syns tydligt hos ett ånglok, se figur 13.12.

Ottomotorn

Att snabbt få in entropi i cylindern löser man i det här fallet genom att entropin alstras inne i cylindern genom förbränning av en blandning av gasformig bensin och luft. Förbränningen sker explosionsartat, dvs mycket snabbt.

Man måste alltså först fylla cylindern med den brännbara bensin-luft-blandningen i ett läge då kolven är inskjuten i cylindern. Det uppnår man genom att motorn först under ett varv fungerar som pump.

Varje halvt varv hos vevaxeln kallas en takt. Laddningen av motorn, pumpningen är alltså två takter lång: Under *insugningstakten* sugs bensin-luft-blandningen in i cylindern, se figur 13.13, detaljbild a. I *kompressionstakten* komprimeras den, detaljbild b. Kolven befinner sig nu i övre dödpunkten och cylindern kan börja arbeta, detaljbild c. Med hjälp av en elektrisk gnista från tändstiftet antänds bensin-luft-blandningen. Förbränningen är ögonblicklig. Vid förbränningen alstras entropi; temperatur och tryck ökar kraftigt. Den heta gasen trycker nu kolven neråt. Därvid minskar temperaturen och trycket. Denna takt kallas *arbetstakt*, detaljbild d. Därefter, under *avgastakten*, trycks avgaserna tillsammans med entropin ut genom avgasröret, detaljbild e.

En sådan encylindermotor arbetar bara en fjärdedel av tiden, under arbetstakten. Den rotationsrörelse som motorn får under arbetstakten fortsätter även under de övriga tre takterna. En ottomotor går jämnare när den har flera cylindrar som turas om att arbeta. De flesta bilmotorerna har fyra cylindrar. Då befinner sig alltid en av cylindrarna i arbetstakten.

För att en ottomotor skall fungera krävs ytterligare några komponenter:

- förgasaren där bensinen förångas och blandas med luft,
- bensinpumpen som pumpar bensinen från tanken till förgasaren,
- tändspole med brytare, som alstrar den höga elektriska spänningen för tändgnistan,
- tändfördelaren som ser till att rätt tändstift får gnistan i rätt ögonblick.

Uppgifter

1. Föreställ dig att ”arbetsämnet” i värmemotorn i figur 13.10 vore en vätska i stället för en gas. Skulle motorn fungera? Motivera!
2. En dieselmotor har nästan samma uppbyggnad som en ottomotor. Den har dock inga tändstift. Bränsle-luftblandningen antänds av sig själv. Hur är detta möjligt?
3. I en kolvångmaskin stängs vanligen ångtillförseln till cylindern när kolven har rört sig en bit åt höger. I stället kunde man låta ångtillförseln vara öppen tills kolven har nått högra änden. Maskinen skulle då vara starkare, den skulle avge mer energi. Hos ånglok vore detta driftsätt möjligt. Det har använts vid start och i uppförsbackar. Vilken nackdel har detta driftsätt?

13.4 Varför kyls luften över jordytan ner ju högre upp man kommer?

På toppen av ett högt berg är det kallare än nere i dalen. Temperaturen avtar med ca $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ per 100 m höjdskillnad. På ett flygplan på 10 000 m höjd är yttertemperaturen ca $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Hur kan man förklara dessa låga temperaturer? Borde inte temperaturskillnaden utjämnas? Entropin strömmar ju från orter med högre temperatur till orter med lägre temperatur. Svaret heter strömningsmotstånd. Entropin strömmar bara om strömningsmotståndet inte är alltför stort. Och luft är ju som bekant en god isolator. Några millimeter luft mellan rutorna i ett treglasfönster är ytterst effektiva. Mellan de låga och de höga skikten i jordens atmosfär ligger flera kilometer luft. En temperaturutjämnning genom värmeledning är alltså praktiskt taget omöjlig.

Men hur uppstår temperaturskillnaden över huvud taget? Luften i jordatmosfären rör sig ständigt. Låt oss titta på en speciell portion luft som rör sig neråt. Eftersom trycket ökar ju längre ner den kommer komprimeras den. Men eftersom luftportionens entropihalt är konstant måste dess temperatur öka enligt rad (3a) i fig 13.9.

Hos en annan luftmängd som rör sig uppåt minskar temperaturen i stället.

Ett visst avgränsat luftpaket med en konstant entropihalt ändrar alltså sin temperatur när det

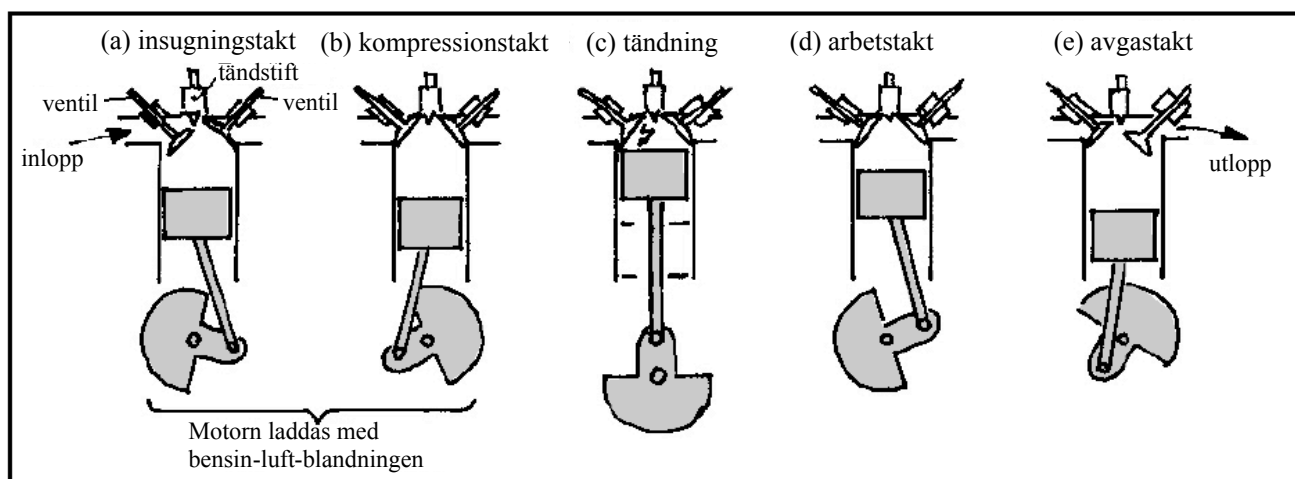


Fig 13.13. Ottomotor vid fem olika tidpunkter under en arbetscykel

rör sig uppåt respektive neråt. Högre upp är det

kallare, längre ner varmare. Till varje höjd hör en bestämd temperatur.

13.5 Den termiska konvektionen

Varm luft stiger som bekant uppåt. Varför är det så? Vi tittar på ett värmeelement. Luften i närheten av elementet värms upp och expanderar (se avsnitt 13.2). Därigenom blir dess densitet mindre än den omgivande luftens, som inte har blivit varmare. Den uppvärmda luften stiger därför uppåt.

Men det sker något mer med den luft som har stigit uppåt: Den avger efter hand entropi till den kallare omgivningsluften och till föremålen i rummet och kyls därför ner igen. Dess densitet ökar igen och den trängs undan av den nyuppvärmda uppstigande luften. Den nerkylda luften sjunker igen och ersätter den nyuppvärmda luften. Det uppstår en luftcirkulation, se fig 13.14. Ett sådant strömningsförlopp kallas *termisk konvektion*.

Den termiska konvektionen är orsaken till många entropitransporter i natur och teknik. Ett exempel är ovannämnda luftcirkulation i ett uppvärmt rum som ser till att entropin från elementet fördelas i hela rummet.

Även vid uppkomsten av vindar spelar den termiska konvektionen en viktig roll. Ett exempel är havsbrisen. Genom solinstrålningen värms marken snabbare än vattnet. Luften över land expanderar därför mer, dess densitet minskar och den stiger uppåt. Från havet där luften inte expanderar lika mycket strömmar luft in mot land. På några hundra meters höjd strömmar luften från landet tillbaka till havet, där den sjunker ner igen.

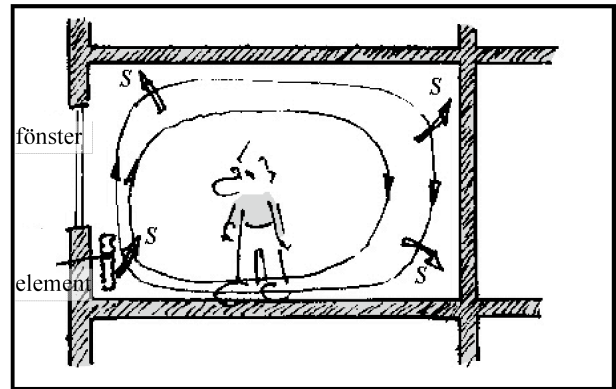


Fig 13.14. Termisk konvektion i ett uppvärmt rum

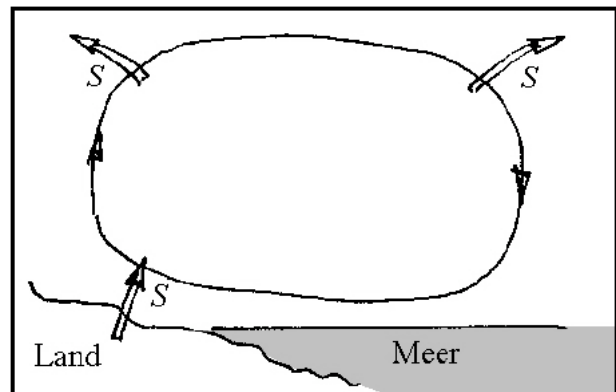


Fig 13.15. Landytan värms upp kraftigt av solen, havet mycket mindre. Det uppstår termisk konvektion.

Temperaturskillnader som leder till att luft värms upp ojämnt förekommer inte bara vid gränsen mellan land och hav utan också på många andra ställen på jorden. Överallt där marken blir varmare än omgivningen uppstår en uppåtriktad luftström (så kallad termik), där marken är kallare är luftströmmen riktad neråt.

Fåglar och segelflygplan använder ofta termiken för att nå stora höjder.

Även passadvindarna är exempel på en termisk konvektion, se fig 13.16. Nära ekvatorn värms luften mycket kraftigt, stiger upp och strömmar på stor höjd norrut och söderut, dvs till områden där det är kallare. Nära den 30:e breddgraden sjunker luften ner igen och strömmar tillbaka mot ekvatorn. Denna tillbakaströmmande luften utgör själva passadvinden.

En annan aspekt av den termiska konvektionen är följande: Luften tar upp entropi på låg höjd och stiger uppåt. Därvid minskar luftens temperatur. Luften avger efter hand entropi, men vid lägre temperatur än när den togs upp.

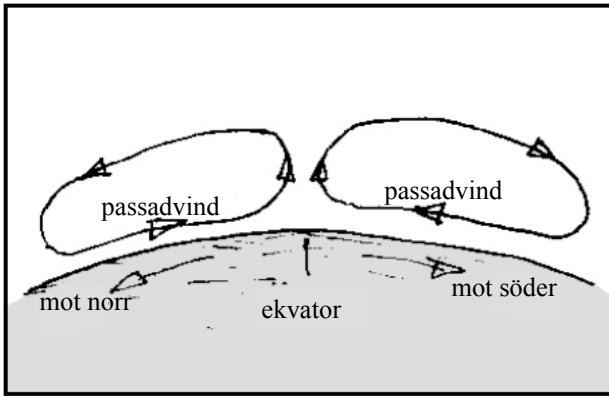


Fig 13.16. Passadvindarnas uppkomst

Luften beter sig alltså på samma sätt som arbetsgasen i en värmemotor: Entropi tas upp vid hög temperatur och avges vid låg temperatur. Den termiska konvektionen är med andra ord en värmemotor, men den här gången är det ingen

axel som försätts i rotation, utan det är luft som försätts i rörelse.

Denna luft innehåller energi, som man kan utvinna genom väderkvarnar, vindkraftverk, segelfartyg och liknande.

Uppgifter

1. Vätskor expanderar bara lite vid entropitillförel. Men även denna låga expansion räcker för att starta den termiska konvektionen. Ge ett exempel. Var tillförs vätskan entropi, var avges den?
2. Varför brinner lågan från ett stearinljus uppåt och inte neråt?

14. Ljus

14.1 Entropitransport i vakuum

Ett varmt föremål kyls ner av sig självt, dess entropi strömmar ut i omgivningen, dvs ut i den omgivande luften och in i underlaget, som det står på. För att stoppa nerkyllningen borde man alltså kunna placera föremålet i vakuum, upphängt i tunna trådar som nästan inte leder entropi. Se fig 14.1.

Men när man gör så händer något märkligt: Vakuumblockan blir märkbart varmare och föremålet kyls ner. Med andra ord, föremålet har avgett entropi, fastän det inte funnits någon värmeledande förbindelse.

Samma sak skulle hända om föremålet befann sig i den lufttomma rymden.

Entropin måste alltså kunna transporteras genom vakuum med hjälp av en hittills okänd bärare. Vad det är för bärare upptäcker man om man hettar upp föremålet så mycket att det börjar glöda. Att ett föremål glöder innebär nämligen att det sänder ut ljus. Och ljus går som bekant lätt genom vakuum. Tänk bara på solljuset som når jorden över ett avstånd på ca 150 miljoner km nästan utan förluster. Ljuset från det glödande föremålet för entropi med sig. Föremålet avger därför ständigt entropi.

Men om föremålet inte glöder, sänder det också ut ljus då? Vad är ljus egentligen?

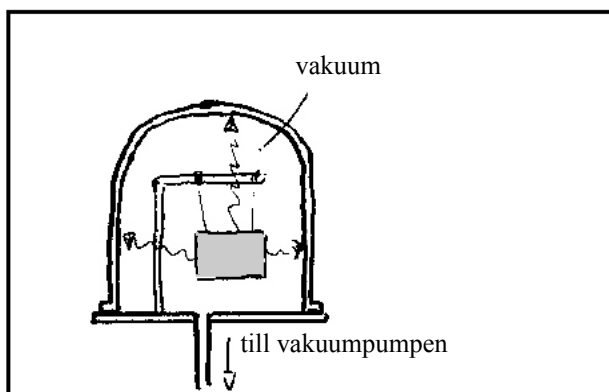


Fig 14.1. Föremålet i vakuumblocken kyls ner fastän det befinner sig i vakuum.

14.2 Olika sorters ljus

En tunn stråle av solljus eller av ljus från en kraftig glödlampa passerar genom ett prisma och träffar på en vit skärm. På skärmen syns en remsa med olika färger, ett så kallat spektrum (fig 14.2).

Ljuset från solen och lamporna består av många olika sorters ljus. Våra ögon registrerar dessa ljussorter som olika färger. När alla ljussorterna blandas uppfattar vi ljuset som "vitt ljus".

Prismat bryter de olika ljussorterna olika mycket. Det röda ljuset bryts minst, därefter kommer det orange, det gula, det gröna, det blå och det violetta ljuset. Det sista bryts mest.

Det ljus som vi kan registrera med våra ögon är bara en liten del av alla ljussorter som förekommer i naturen och som kan framställas med olika tekniska hjälpmedel. Alla dessa ljussorter, synliga såväl som osynliga kallas "elektromagnetisk strålning".

Även ljuset från solen och från glödlampor innehåller osynlig strålning, och även denna strålning bryts i ett prisma. Med hjälp av speciella mätinstrument kan man påvisa den och upptäcker då att det finns "ljus" som bryts ännu mer än det violetta. Man kallar det för *ultraviolet strålning*. Det finns också ljus som bryts mindre än det röda ljuset, den så kallade *infraröda strålningen*.

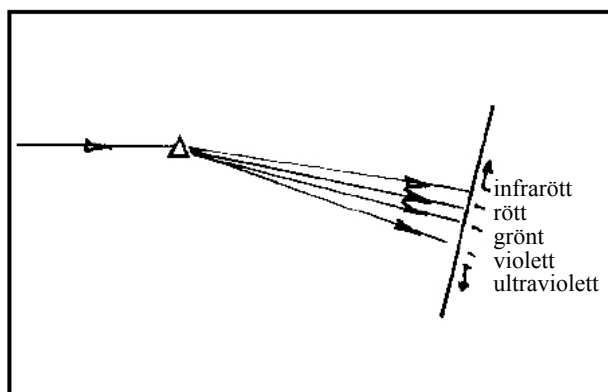


Fig 14.2. Vitt ljus delas upp i sina beståndsdelar genom ett prisma.

Alla föremål som har en temperatur som är högre än 0 K avger elektromagnetisk strålning. Hur mycket strålning av varje sort och hur mycket strålning totalt ett föremål utsänder beror på föremålets temperatur.

Den totala utstrålningen från ett föremål är proportionell mot den fjärde potensen av dess absoluta temperatur (*Stefan-Boltzmanns lag*).

Dessutom förändras strålningens sammansättning då temperaturen hos det strålade föremålet ändras. Exempelvis är solens ytemperatur ca 5800 K. Det ljus som solen strålar ut är i huvudsak synligt ljus. Temperaturen hos en glödlampa däremot har en temperatur på ca 3000 K. Här är andelen infraröd strålning mycket större än andelen synligt ljus. Vid en temperatur på ca 1100 K ($\approx 800\text{ }^\circ\text{C}$) glöder föremålet rött. Av det synliga ljuset utsänds bara det röda, nästan all strålning ligger inom det infraröda området. Under 900 K ($\approx 600\text{ }^\circ\text{C}$) avger föremålet bara infraröd strålning.

14.3 Entropi- och energitransport med ljus

Vi har redan sett att ett upphettat föremål som befinner sig i vakuum kyls ner. Det måste alltså avge entropi. Samtidigt vet vi att föremålet sänder ut ljus. Entropin måste alltså transporteras bort från föremålet med hjälp av ljuset.

Dessutom vet vi att entropi är en energibärare. Överallt där det flödar entropi följer det också med energi. Föremålet som kyls ner avger med ljuset alltså både entropi och energi.

Ljus (synligt såväl som osynligt) transporterar entropi och energi.

Man skulle kunna tro att varje föremål i vakuum skulle kylas ner ända till 0 K, men så är inte fallet. Tvärtom: Om ett föremål i vakuum har lägre temperatur än omgivningstemperaturen värms det upp i stället. Se fig 14.3.

Föremålet värms upp, fastän det avger entropi. Hur är detta möjligt? Svaret är att även alla andra föremål sänder ut strålning. Vårt föremål både sänder ut och tar emot entropi från omgiv-

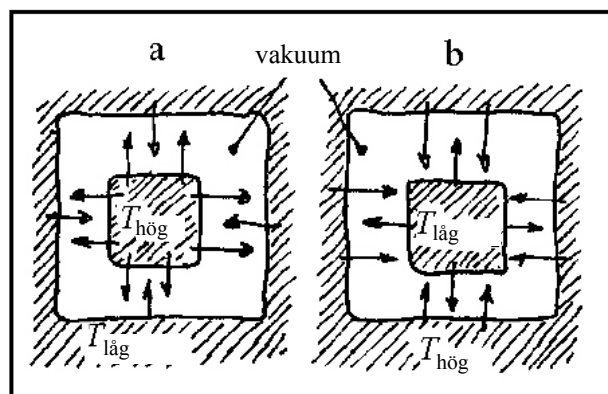


Fig 14.3. Även i vakuum uppstår termisk jämvikt mellan föremålen.

ningen. Om föremålets temperatur är högre än omgivningens avger det mer entropi än vad det tar emot (fig 14.3a), om dess temperatur är lägre än omgivningens tar det emot mer entropi än vad det avger (fig 14.3b). I båda fallen går det en ”nettoentropiström” från området med högre till området med lägre temperatur, och i båda fallen är det slutliga tillståndet detsamma: Temperaturskillnaderna jämnas ut, det uppstår termisk jämvikt.

Även när entropitransporten sker med elektromagnetisk strålning flödar (netto-)entropiströmmen från områden med högre till områden med lägre temperatur.

Uppgift

Ett föremål placeras mellan två parallella väggar A och B som har olika temperatur T_A respektive T_B (se fig 14.4). Anta att T_A är större än T_B .

- Vad kan man säga om föremålets sluttemperatur?
- Vad kan man säga om energiströmmarna mellan väggarna och mellan väggarna och föremålet?

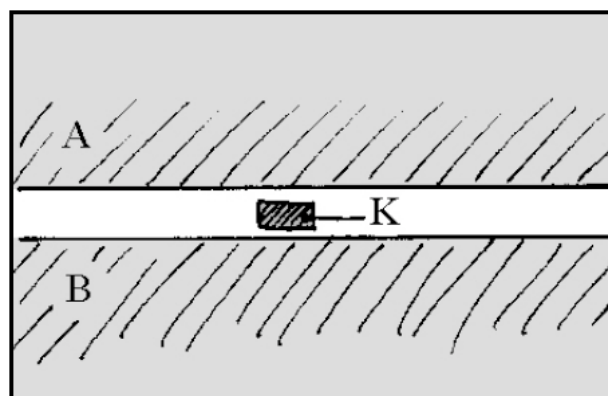


Fig 14.4. Till uppgiften i slutet av avsnitt 14.3.

14.4 Ljusets temperatur

Ljuset som sänds ut av ett föremål har samma temperatur som själva föremålet. Exempelvis har ljuset från solytan samma temperatur som själva solytan, dvs ca 6000 K. Det här verkar konstigt: Om solljuset har temperaturen 6000 K, borde då inte allt som utsätts för solstrålning börja brinna med en gång? Och borde man inte kunna mäta solljusets temperatur med en termometer som ställs i solen?

För att lösa detta problem måste vi undersöka hur en termometer fungerar. För att mäta temperaturen hos ett föremål måste termometern ha kontakt med föremålet. Om man håller termometern i solljuset har den visserligen kontakt med solljuset, men termometern har samtidigt också kontakt med andra föremål.

Termometern befinner sig i luft. Vilken temperatur kommer termometern att visa, luftens eller solljusets? Det blir en kompromiss; termometern visar varken luftens eller solljusets temperatur.

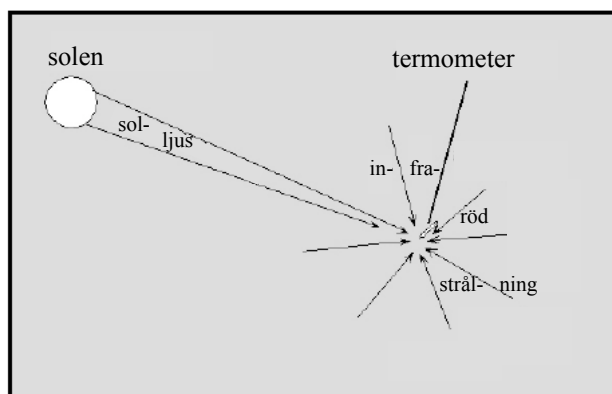


Fig 14.5. Solljuset kommer bara från ett litet riktningssområde. Från alla andra håll kommer infraröd strålning med temperaturen 300 K.

Men även om man placerar termometern i vakuum är den temperatur som den visar mycket lägre än 6000 K. Även här gör termometern en kompromiss: Förutom med solljuset har termometern ”kontakt” med infrarödstrålningen från omgivningen. Denna strålning har samma temperatur som omgivningen, dvs ca 300 K. Och medan solstrålningen träffar termometern i ett ganska litet vinkelområde, är vinkelområdet för 300 K-strålningen mycket stort, se fig 14.5.

Även i detta fall kommer termometerens tempe-

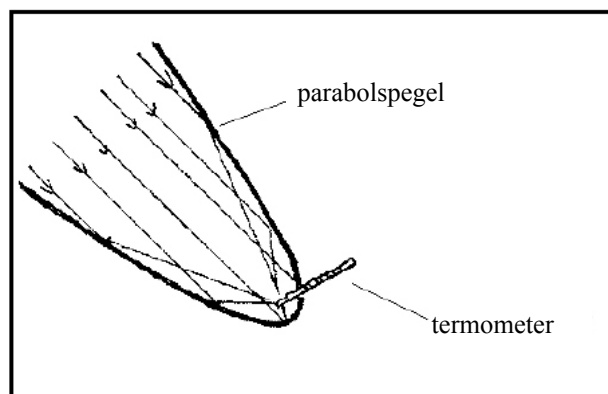


Fig 14.6. Parabolspegeln ser till att solljuset når termometern från alla håll.

ratur att ligga ganska nära omgivningstemperaturen.

För att mäta solljusets temperatur måste man alltså se till att termometern tar emot solljuset från alla möjliga håll. Det kan man uppnå med hjälp av linser eller speglar, se fig 14.6. Om termometern ”ser” solen från alla håll kommer den också att visa solens temperatur. (Då krävs det dock en annan termometer.)

Med en positiv lins – ett brännglas – kan man få mycket höga temperaturer genom att man fokuserar solljuset i en liten punkt, brännpunkten, till exempel på en bit trä. Med andra ord ökar man vinkelområdet, i vilket solljuset träffar på träbiten. Men solljuset kommer fortfarande från ett begränsat område. Träet får en ganska hög temperatur, som dock fortfarande är mycket lägre än solljusets.

14.5 Jordens entropi- och energibalans

Jorden tar ständigt emot entropi och därmed energi från solen.

Intensiteten hos den energiström från solen som träffar jordytan kallas *solarkonstanten* och är lätt att komma ihåg: Den uppgår till ca 1 kW/m^2 . Det innebär att en yta på en kvadratmeter, som står vinkelrätt mot solljusets riktning, tar emot en energiström på 1 kW, se fig 14.7. Står ytan snett i förhållande till solstrålningen är instrålningen förstärkt lägre. Dessutom gäller värdet 1 kW/m^2 bara vid molnfri himmel.

Solarkonstanten $\approx 1 \text{ kW/m}^2$

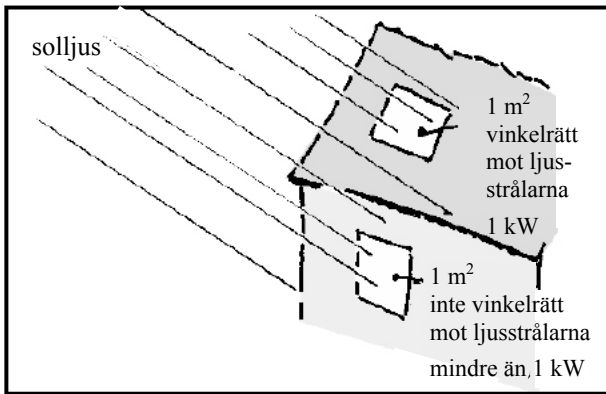


Fig 14.7. På en yta av 1 m², som står vinkelrätt mot solen, träffar en energiström på 1 kW.

Om jorden inte avgav vare sig entropi eller energi skulle den värmas upp alltmer, men så är inte fallet. Jordens temperatur förblir konstant, eftersom jorden avger infraröd strålning och därmed både entropi och energi.

Medan solljuset når jorden bara från ett håll avger jorden strålning åt alla håll, se fig 14.8.

Eftersom jorden varken blir varmare eller kallare måste den avgivna energiströmmen vara lika stor som den inkommande:

$$P_{\text{ut}} = P_{\text{in}}$$

Entropibalansen är lite mera komplicerad. På jorden alstras ju som bekant mycket entropi. Det utstrålade infraröda ljuset måste alltså föra med sig mer entropi ut i rymden än det inkommande ljuset från solen:

$$I_{S \text{ ut}} = I_{S \text{ in}} + I_{S \text{ alstrad}}$$

Jordens energi- och entropibalans beskrivs alltså med samma ekvationer som gäller för staven i fig 11.7, avsnitt 11.3.

Jorden kan också jämföras med ett uppvärmt hus. Husets värmepanna levererar hela tiden en bestämd energi- och entropiström. Genom värmeläckage flödar hela energiströmmen ut ur huset igen. Med energiströmmen flödar dock inte bara den entropi som värmepannan har avgett utan också den entropi som har alstrats i huset och i väggarna.

Det faktum att entropiströmmen från jorden (respektive från huset) ställer in sig på ett värde som är konstant med tiden innebär att det har uppstått *flödesjämvikt*.

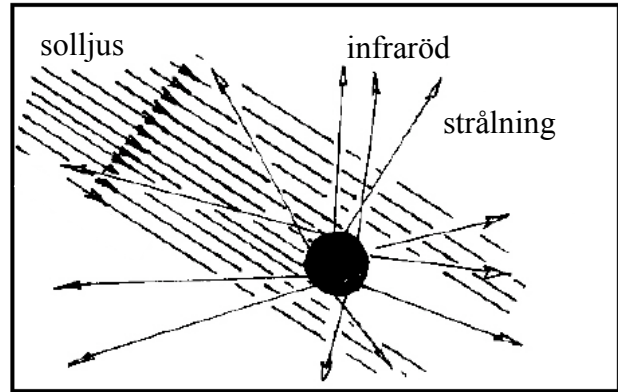


Fig 14.8. Jorden tar emot solljus från ett litet riktningsområde, men strålar ut åt alla håll.

14.6 Växthuseffekten

Jordens atmosfär släpper som bekant igenom synligt ljus, annars skulle det vara mörkt även på dagen. Infraröd strålning däremot har svårt att passera genom atmosfären. Orsaken till detta är i huvudsak koldioxid, CO₂, som ingår i liten mängd i atmosfären. Vad händer om atmosfärens CO₂-halt ökar?

Det infallande solljuset påverkas inte. Jorden värms upp av solen i samma utsträckning som tidigare. Värmeförlusten minskar däremot, eftersom jordens infraröda strålning inte avges lika lätt längre. Därmed ökar temperaturen. Högre temperatur betyder högre utstrålning. Utstrålningen ökar alltså tills det återigen har uppstått flödesjämvikt: tills den inkommande och den utgående energiströmmen har samma värde igen. Den nya flödesjämvikten skiljer sig från den gamla i temperaturen: Temperaturen har ökat.

Ju mera koldioxid atmosfären innehåller desto högre är jordens medeltemperatur.

För att förtydliga situationen jämför vi återigen jorden med ett uppvärmt hus. Förbättrar man husets isolering, men eldar lika mycket som förut kommer temperaturen i huset att öka. Men också vid denna högre temperatur är energiströmmen genom värmeläckage ut ur huset lika stor som den energiström som värmepannan levererar.

Atmosfärens CO₂-halt uppgår till ca 0,03 %. För närvarande ökar CO₂-halten kraftigt på grund av förbränningen av kol och olja i kraftverk och hushåll och av bilbränslen (bensin och

diesel) i fordon. Vid fotosyntesen tar växterna upp koldioxid och avger syre i stället. Växternas nedbrytning av CO_2 minskar dock för närvarande, eftersom allt större områden av de tropiska regnskogarna huggs ner. Man måste därför räkna med att jordens temperatur kommer att öka under de närmaste årtiondena. Även om denna ökning bara uppgår till några °C kan följderna bli svårartade. Risker är att delar av landisen i polarområdena smälter. Det skulle leda till stigande havsnivå och översvämning av stora landområden.

Fenomenet att solljuset kan passera jordens atmosfär ohindrat, medan den infraröda strålningen från jordytan hindras kallas *växthus-effekten*, eftersom samma sak händer i växthus. Här är det glaset som hindrar den infraröda strålningen, medan synligt ljus kan passera lätt. Därigenom är temperaturen inne i ett växthus högre än utanför.