

Termodynamikens andra huvudsats

Jun 12, 2026, 5 min read

#fysik

#termodynamik

#entropi

#värmemaskiner

Kapitel: 20.1–20.7 · **Kurs:** F0004T **Förkunskaper:** Termodynamikens första lag, Termodynamiska processer

1. Andra huvudsatsen

1.1 Tre ekvivalenta formuleringar

Andra huvudsatsen (2:a HS)

Clausius formulering: Värme kan *inte* spontant flöda från ett kallare till ett varmare föremål.

Kelvin-Planck formulering: Det är omöjligt att bygga en maskin som enbart omvandlar värme till arbete utan att avge värme till en kall reservoar.

Entropiformulering: Entropin i ett isolerat system kan aldrig minska:

$$\Delta S_{tot} \geq 0$$

Alla tre formuleringar är ekvivalenta — de säger samma sak med olika ord.

1.2 Reversibla och irreversibla processer

- **Reversibel process:** Sker oändligt långsamt och nära jämvikt — kan återgå utan nettoförlust. Idealisering.
- **Irreversibel process:** Alla verkliga processer. Entropin ökar alltid.

Exempel på irreversibla processer: Friktion, blandning av vätskor, värmeöverföring över temperaturdifferens, fri expansion.

2. Värmemaskiner

2.1 Grundprincip

En värmemaskin tar in värme Q_H från en *varm källa* (temperatur T_H), omvandlar en del till arbete W , och avger resten $|Q_L|$ till en *kall sänka* (temperatur T_L).

Cyklisk process ($\Delta U_{cykel} = 0$, maskinen återkommer till samma tillstånd):

$$Q_{tot} = W_{tot} \implies Q_H + Q_L = W$$

(Notera: $Q_L < 0$ – värme lämnar systemet.)

2.2 Verkningsgrad

Definition: Verkningsgrad

Hur stor del av den tillförda värmen som omvandlas till nyttigt arbete:

$$e = \frac{W}{Q_H} = 1 - \left| \frac{Q_L}{Q_H} \right|$$

Alltid: $e < 1$. En del värme måste alltid dumpas till den kalla sänkan.

3. Carnot-cykeln

3.1 Den idealt effektiva värmemaskinen

Carnot-cykeln

Carnot-cykeln är den maximalt effektiva cykeln för en värmemaskin som arbetar mellan två temperaturer T_H och T_L . Den består av fyra steg:

| Steg | Process | Vad händer |
|-------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| $a \rightarrow b$ | Isoterm expansion vid T_H | Tar upp värme Q_H |
| $b \rightarrow c$ | Adiabatisk expansion | Kyls från T_H till T_L |
| $c \rightarrow d$ | Isoterm kompression vid T_L | Avger värme Q_L |
| $d \rightarrow a$ | Adiabatisk kompression | Värms från T_L till T_H |

Carnotverkningsgrad:

$$e_{Carnot} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$$

Temperaturer i Kelvin!

Insikt: Maximera verkningsgraden

e_{Carnot} ökar med högre T_H och lägre T_L . Det är därför kraftverk strävar efter höga ångtemperaturer och kalla kylvattentemperaturer.

 **Exempel: Carnot-verkningsgrad** >

4. Förbränningsmotorer

4.1 Otto-cykeln (bensinmotor)

| Steg | Process | Vad händer |
|-------------------|-------------------------|--|
| $a \rightarrow b$ | Adiabatisk kompression | Kolven pressar ihop gasen |
| $b \rightarrow c$ | Isokor värmeförsörjning | "Förbränning" – snabb värmeförsörjning |
| $c \rightarrow d$ | Adiabatisk expansion | Gasen driver kolven – <i>arbete</i> |
| $d \rightarrow a$ | Isokor värmeförsörjning | "Avgaser" – snabb kylning |

Verkningsgrad:

$$e_{Otto} = 1 - r^{1-\gamma}$$

där $r = V_{max}/V_{min}$ är kompressionsförhållandet.

Typiskt: $r = 8, \gamma = 1,4 \rightarrow e_{teor} = 56\%, e_{verkl} \approx 35\%$.

4.2 Diesel-cykeln

Liknande Otto, men förbränningen sker vid konstant tryck (isobar). Högt kompressionsförhållande ($r = 15-20$) ger $e_{teor} \approx 65\%, e_{verkl} \approx 40\%$.

5. Kylmaskiner

5.1 Grundprincip

En kylmaskin (kylskåp, luftkonditionering, värmepump) använder arbete för att *flytta värme uppströms* – från ett kallare till ett varmare ställe.

5.2 Köldfaktor (COP)

Definition: Köldfaktor

Hur mycket värme som bortförs från det kalla stället per enhet tillförd arbete:

$$K = COP = \frac{|Q_L|}{W} = \frac{|Q_L|}{|Q_H| - |Q_L|}$$

K kan vara *större* än 1! Typiska kylskåp: $K \approx 3-4$.

Carnotkylarens köldfaktor:

$$K_{Carnot} = \frac{T_L}{T_H - T_L}$$

6. Entropi

6.1 Definition

Definition: Entropi

Entropi S är ett mått på “oordning” eller “antal möjliga mikroskopiska tillstånd” i ett system.

För reversibla processer:

$$dS = \frac{dQ}{T} \implies \Delta S = \int \frac{dQ}{T}$$

Vid **isoterm process**:

$$\Delta S = \frac{Q}{T}$$

Vid uppvärmning från T_1 till T_2 :

$$\Delta S = mc \ln \frac{T_2}{T_1}$$

6.2 Entropi som tillståndsfunktion

Entropi S beror bara på systemets aktuella tillstånd – inte på processen som ledde dit. Den är en *tillståndsfunktion*, precis som inre energi U .

6.3 Andra huvudsatsen i entropiform

$$\Delta S_{tot} \geq 0$$

Likhetstecken gäller *enbart* för reversibla processer. Alla verkliga (irreversibla) processer ökar entropin.

6.4 Carnot-cykelns entropi

Under en komplett Carnotcykel:

$$\Delta S_{tot} = \frac{Q_H}{T_H} + \frac{Q_L}{T_L} = 0$$

Det bekräftar att Carnotprocessen är reversibel – entropin förändras inte totalt.

☰ [Exempel: Entropiändring vid uppvärmning \(Ex 20.6\)](#) >

💡 Intuition: Varför händer inte allt baklänges?

Entropi är ett mått på antalet möjliga mikrotillstånd. En gas utspridd i ett rum har astronomiskt fler möjliga tillstånd än samma gas komprimerad i ett hörn. Det är inte *omöjligt* att gasen spontant komprimeras – det är bara orimligt osannolikt.

Läsning

- [Chapter 20 The Second Law of Thermodynamics](#)

Se även

- [Termodynamiska processer](#) – pV-diagram och procesberäkningar
 - [Termodynamikens första lag](#) – energibevarandet
 - [Ideala gaser](#) – ideala gaslagen och γ
-

Resurser

Wikipedia

- [Second law of thermodynamics](#)
- [Entropy](#)
- [Carnot cycle](#)
- [Otto cycle](#)

Fördjupning

- University Physics with Modern Physics (Freedman & Young) kap 20
- Fysika upplaga 5, kap 20 (Fa5: formelblad)

Föreläsningsanteckningar

Från föreläsning: 2025-12-15, F0004T Föreläsare: Erik Elfgren

2025-12-15 – TERM08

20.4 Kylmaskiner

En kylmaskin pumpar värme från T_L till T_H med hjälp av arbete W .

1:a HS: $Q_{tot} = W_{tot} = Q_H + Q_L$ (med $Q_H < 0$, $Q_L < 0$)

Köldfaktor (Coefficient of Performance): $K = COP = \frac{|Q_L|}{W} = \frac{|Q_L|}{|Q_H| - |Q_L|}$

Carnots kylmaskin: Från $\frac{Q_L}{Q_H} = -\frac{T_L}{T_H}$ (Carnotvillkor): $K_{Carnot} = \frac{T_L}{T_H - T_L}$

20.5 Andra huvudsatsen

Ren värmeöverföring från ett kallare till ett varmare system är omöjligt. \Leftrightarrow
Entropin ökar alltid för ett slutet system. $\implies \Delta S \geq 0$

20.7 Entropi

Entropi $S \approx$ oordning. Tillförd värme ökar oordning (molekylernas slumpmässiga rörelser ökar).

$$[S] = \frac{\text{J}}{\text{K}}$$

$$\text{Reversibla processer: } dS = \frac{dQ}{T} \implies \Delta S = \int \frac{dQ}{T}$$

$$\text{Isoterm process: } \Delta S = \frac{Q}{T}$$

Entropin beror bara på systemets tillstånd (som inre energi) – inte på processen.

Exempel 20.6 – Vatten värms från 273,15 K till 373,15 K ($m = 1,00 \text{ kg}$, $c_p = 4190 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$): $\Delta S_{12} = \int_{T_1}^{T_2} \frac{mc dT}{T} = mc \ln \frac{T_2}{T_1} = 1,31 \frac{\text{kJ}}{\text{K}}$

Exempel 20.9 – Entropi i Carnot-cykeln ($Q_H = 2,00 \text{ kJ}$, $T_H = 500 \text{ K}$, $T_L = 350 \text{ K}$):

$$\Delta S_{tot} = \Delta S_{ab} + \Delta S_{bc} + \Delta S_{cd} + \Delta S_{da}$$

- Isoterma steg: $\Delta S_{ab} = \frac{Q_H}{T_H}$, $\Delta S_{cd} = \frac{Q_L}{T_L}$
- Adiabatiska steg: $\Delta S_{bc} = \Delta S_{da} = 0$

$$\text{Carnotvillkor } \frac{Q_H}{T_H} = -\frac{Q_L}{T_L} \text{ ger: } \Delta S_{tot} = 0 \frac{\text{J}}{\text{K}}$$

Carnot-cykeln är reversibel – entropin förändras ej totalt.
