

# Termodynamikens andra huvudsats

Jun 23, 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  $\gamma$
-

# 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 ( $m = 1,00$  kg,  $c_p = 4190$  J/(kg·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 ( $Q_H = 2,00$  kJ,  $T_H = 500$  K,  $T_L = 350$  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.

---