

THERMODYNAMICA

Prof. dr. Johan D'heer

Bachelor of Science in de biowetenschappen
Academiejaar 2019 – 2020



Hoofdstuk 19

Essential University Physics

Richard Wolfson
3th Edition

De Tweede Wet van de Thermodynamica

Geen leerstof

- 19.4: item Statistical Interpretation of Entropy (p 363)

19.1 Reversibel ↔ Irreversibel

- **Vb.: reversibel proces**
bunjeejumper aan perfecte elastiek: vallen en, omgekeerd proces, terugkeren naar begin.
- **Vb.: irreversibel proces**
Warmte stroomt spontaan van heet voorwerp naar koud voorwerp, niet omgekeerd.
Omgekeerd is wel mogelijk (vb. koelkast), maar dan niet spontaan.
Merk op: eindtoestand bij irreversibel proces is wanordelijker.
- Beide processen: behoud van energie voor het oorspronkelijke en omgekeerde proces.
- Tweede wet van de thermodynamica zegt in welke richting processen spontaan verlopen.

© Johan D'heer

3

19.2 Tweede Wet van de Thermodynamica

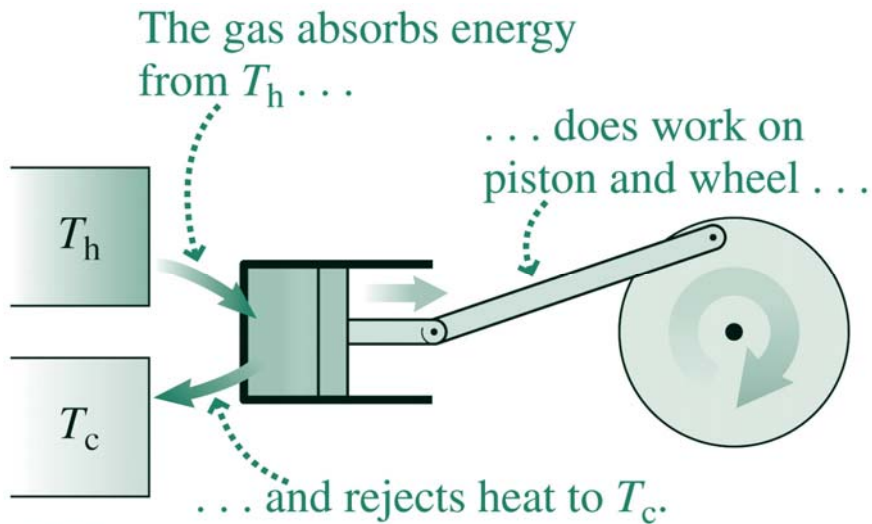
- **De tweede wet van de thermodynamica** zegt dat systemen van nature streven naar een toestand van grotere wanorde.
- Tweede wet kent verschillende formuleringen.
 - De **Kelvin-Planck formulering van de tweede wet** (geldig voor warmtemachines) zegt:
het is onmogelijk een perfecte warmtemachine te maken.
 - Een **warmtemachine** is een systeem dat via een cyclisch proces warmte onttrekt aan een reservoir en deze warmte omzet in arbeid. Wordt de warmte volledig omgezet in arbeid, dan heeft men een perfecte warmtemachine.

© Johan D'heer

4

Warmtemachines

- Vb.:

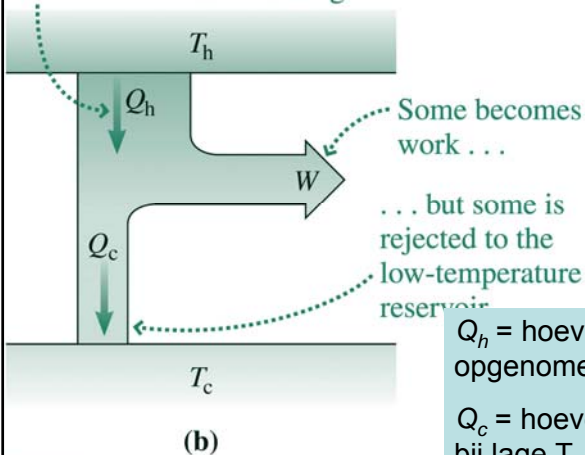


© Johan D'heer

5

Warmtemachine: Schematische Voorstelling

Extract heat Q_h from the high-temperature reservoir of a real heat engine.



Kringproces, dus

$$\Delta U = 0$$

zodat

$$Q_h = W + Q_c$$

(energiebehoud)

Q_h = hoeveelheid warmte opgenomen bij hoge T

Q_c = hoeveelheid warmte afgestaan bij lage T

W = hoeveelheid geleverde arbeid

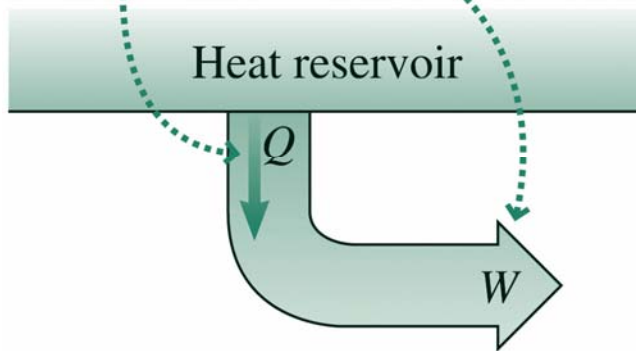
(alle grootheden hier > 0)

© Johan D'heer

6

Perfekte Warmtemachine (onmogelijk!)

All the heat Q extracted from the reservoir of a perfect heat engine becomes work.



(a)

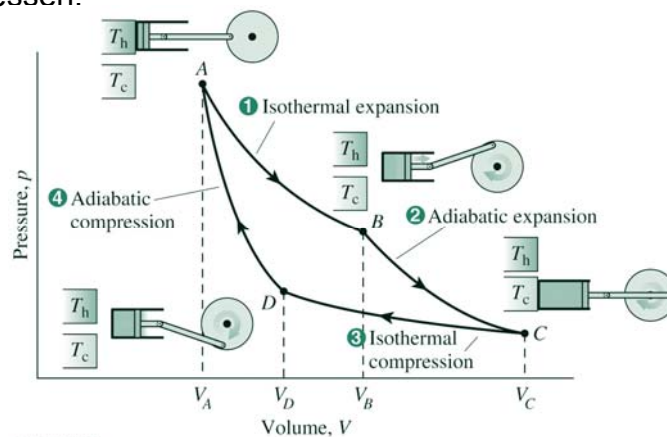
© 2012 Pearson Education, Inc.

© Johan D'heer

7

Vb.: De Carnot Motor

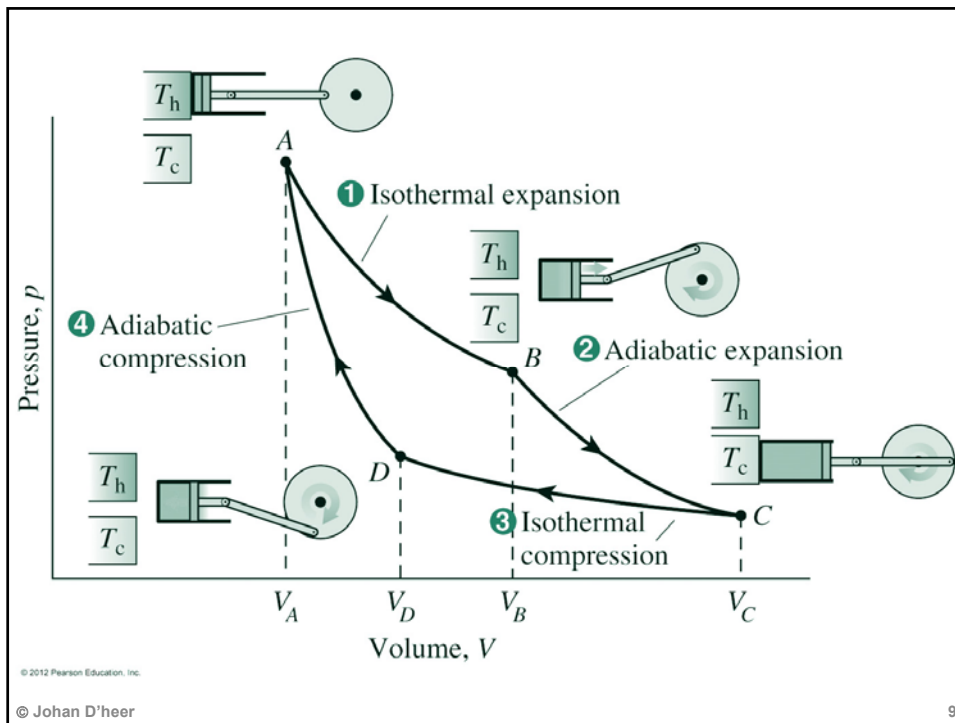
- Een belangrijke warmtemachine is de **Carnot motor**, waarvan het cyclisch proces, doorlopen in wijzerzin, bestaat uit twee adiabatische en twee isotherme reversibele processen.



© 2012 Pearson Education, Inc.

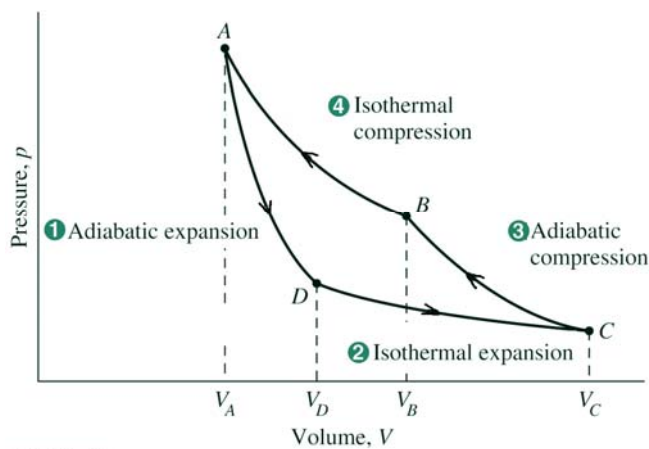
© Johan D'heer

8



Aanvulling: de Inverse Carnot Motor

- Bij de **inverse Carnot motor** wordt hetzelfde cyclisch proces (twee adiabatische en twee isotherme reversibele processen) doorlopen, maar nu in tegenwijzerzin.



Carnot Efficiëntie

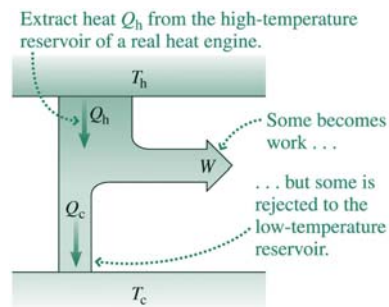
- De **efficiëntie** van een warmtemachine, gedefinieerd als de verhouding van de geleverde arbeid tot warmte opgenomen uit een reservoir op hoge temperatuur, is

$$e = \frac{W}{Q_h} = \frac{Q_h - Q_c}{Q_h} = 1 - \frac{Q_c}{Q_h}$$

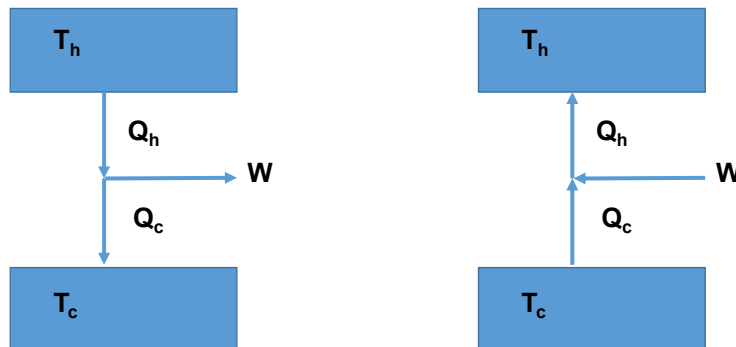
- LET OP: alle grootheden zijn hier positief!
- Voor een Carnot motor is $Q_c/Q_h = T_c/T_h$, en de efficiëntie wordt

$$e_{\text{Carnot}} = \frac{W}{Q_h} = 1 - \frac{T_c}{T_h}$$

- Opmerking: efficiëntie is verhouding gewenste output/nodige input.



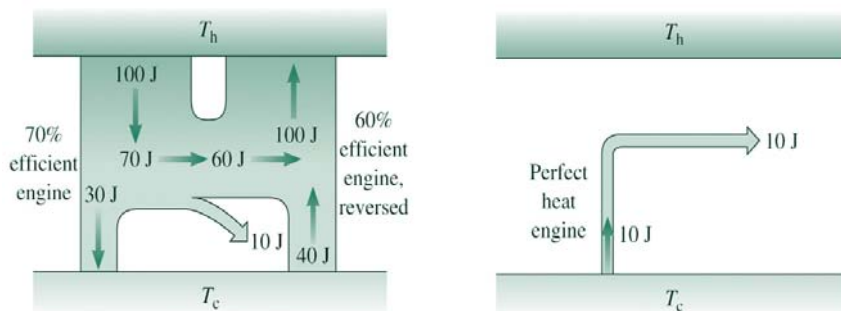
Carnot motor vs. inverse Carnot motor



$$Q_h = W + Q_c$$

Carnot motor is Efficiëntste Warmtemachine

- Carnot motor heeft de meest efficiënte cyclus : geen enkele andere warmtemachine die tussen deze twee temperaturen werkt is efficiënter.
- Als men een efficiëntere warmtemachine zou combineren met een inverse Carnot motor zou men op die manier een perfecte warmtemachine zou kunnen maken (in tegenspraak met Kelvin-Planck)



© Johan D'heer

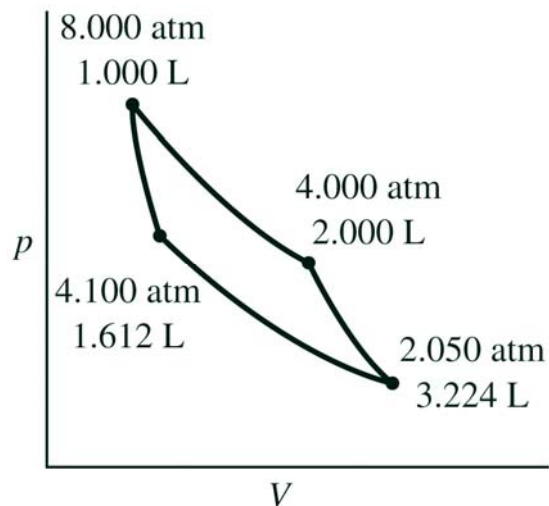
13

Vraagstuk 16 hfdst. 19

- Een Carnot motor neemt bij iedere cyclus 950 J warmte op en levert 360 J arbeid.
 - a) Bereken de efficiëntie van de motor.
 - b) Hoeveel warmte wordt afgestaan aan de omgeving?
 - c) Als de omgevingstemperatuur 10°C is, wat is dan de maximumtemperatuur in de motor?

Vraagstuk 42 hfdst. 19

- 0,20 mol ideaal gas ondergaat volgende Carnotcyclus.
- Bereken
 - (a) Q_h ,
 - (b) Q_c ,
 - (c) W ,
 - (d) e .
- Bepaal T_{\max} en T_{\min} en bereken met deze temperaturen e .



Vraagstuk 29 hfdst. 19

- Een elektrische centrale levert 750 MW. Koelwater van 15°C (debiet = $2,8 \times 10^4$ kg/s) verlaat de centrale met temp. = $23,5^\circ\text{C}$. In de onderstelling dat enkel aan het water warmte wordt afgestaan, bereken
 - (a) het tempo waarmee energie aan de brandstof wordt onttrokken,
 - (b) de efficiëntie,
 - (c) de maximumtemperatuur van de centrale.

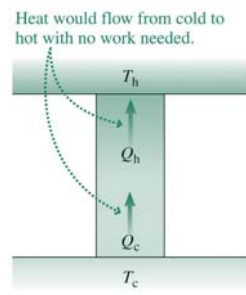
Vraagstuk 19 hfdst. 19

- Het menselijk lichaam heeft een efficiëntie van 25% voor het omzetten van chemische energie naar mechanische arbeid.
- Kan je het menselijk lichaam beschouwen als een warmtemachine, werkend tussen de lichaamstemperatuur en de omgevings-temperatuur?

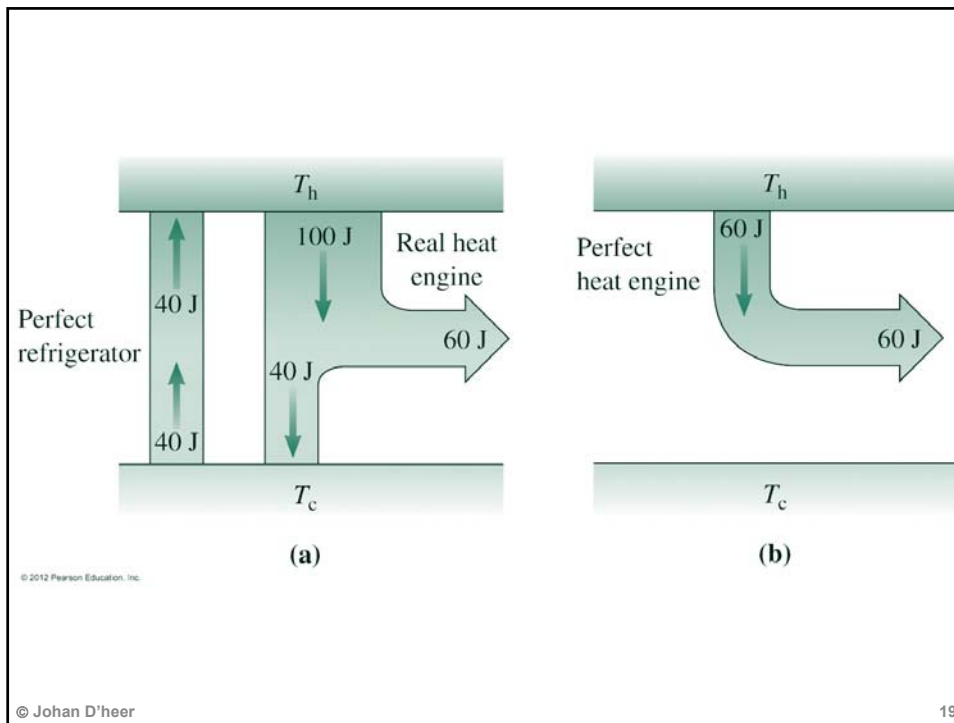
Clausius Formulering Tweede Wet

- **Clausius formulering van de tweede wet:**

Het is onmogelijk om een perfecte koelmachine (= een machine welke warmte transporteert van een koud voorwerp naar een warmer voorwerp, zonder dat hiervoor arbeid nodig is) te bouwen.

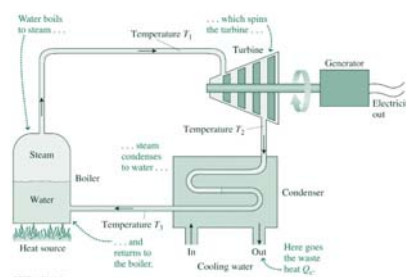


- Kelvin-Planck formulering en Clausius formulering zijn equivalent, d.w.z. als de een waar of vals is, is ook de andere waar of vals.
- Als een perfecte koelmachine mogelijk is, kan men een perfecte warmtemachine maken (zie boek p.356)
- Als een perfecte warmtemachine bestaat, kan men een perfecte koelmachine maken (zie oef. 38)

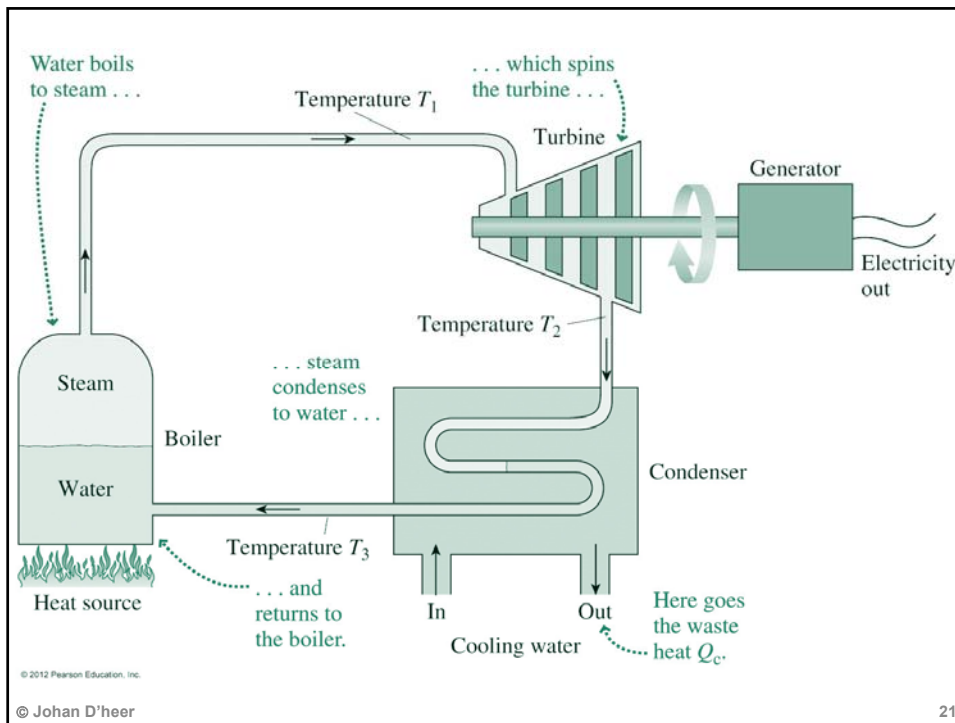


19.3 Implicaties voor Energietechnologie

- De tweede wet toont dat we onmogelijk thermische energie voor 100% kunnen omzetten in arbeid.
 - De efficiëntie hangt af van de hoogste en laagste beschikbare temperaturen:
 - De eerste wordt beperkt door de gebruikte materialen.
 - De laatste wordt beperkt door de temperatuur van de omgeving.
 - Deze beperkingen beïnvloeden
 - Elektrische krachtcentrales
 - Benzinemotoren
 - Straalmotoren



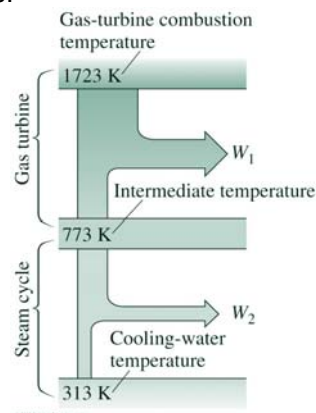
A thermal electric power plant: The most common heat sources are fossil fuel combustion and nuclear fission. Typical efficiencies are 30–45%.



21

Gecombineerde Cycli in Krachtcentrales

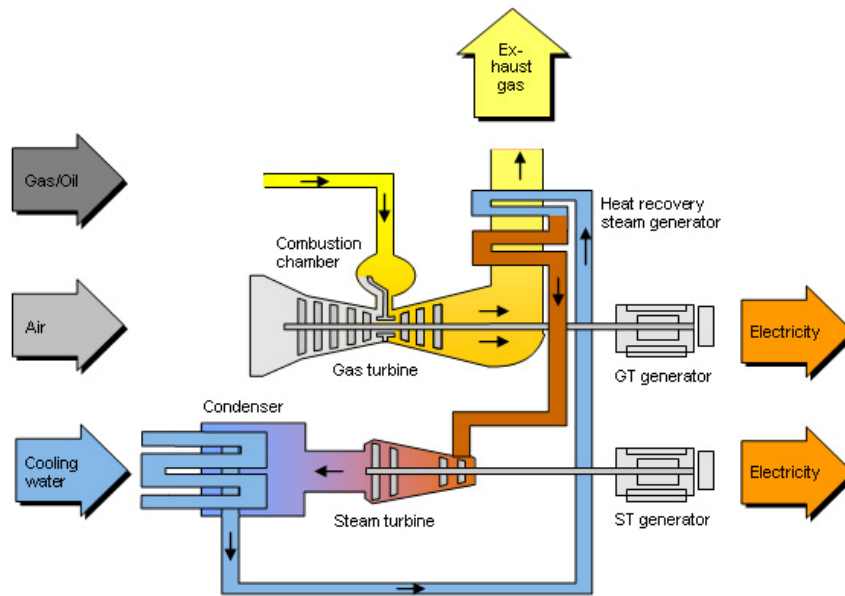
- **Gasturbines** gebruiken hete verbrandingsgassen om een turbine te doen draaien.
 - Vb.: straalmotoren.
 - Gasturbines werken bij hoge temperaturen T_h .
 - Zijn niet erg efficiënt omdat T_c ook hoog is.
- De uitlaatgassen van een gasturbine worden gebruikt om een conventionele stoomcyclus aan te drijven. Gevolg: een efficiëntere krachtcentrale.
 - Theor. efficiëntie gasturbine 55%, theor. efficiëntie stoomturbine 60%, theor. efficiëntie geheel 82%. Praktisch $\approx 60\%$.
 - Gevolg: minder uitstoot van vervuilende stoffen en broeikasgassen per eenheid geproduceerde elektrische energie.



© Johan D'heer

22

Gecombineerde Cycli in Krachtcentrales



23

Conceptvraag

- Is het mogelijk om warmte te transporteren van een koud reservoir naar een heet reservoir?
- A) Nee, de tweede wet van de thermodynamica verbiedt dit.
- B) Ja, dit kan spontaan gebeuren.
- C) Ja, maar er moet dan wel arbeid worden geleverd.
- D) Theoretisch kan dit, maar dit is nog niet verwezenlijkt.

© Johan D'heer

24

Conceptvraag

- Een fabrikant van motoren beweert dat zijn motor tijdens iedere cyclus 100 J warmte uit kokend water van 100°C neemt, voor 80 J arbeid levert, en 20 J warmte afstaat aan de omgeving. Kan dit?
- A) Volgens de tweede wet moet de afgestane warmte altijd groter zijn dan de geleverde arbeid, dus nee.
- B) Nee, want deze motor is in tegenspraak met de eerste wet omdat $100\text{ J} + 20\text{ J} \neq 80\text{ J}$.
- C) Deze motor zou warmte opnemen bij lage temperatuur en warmte afstaan bij een hogere temperatuur, dus nee.
- D) Nee, want de efficiëntie van deze motor is groter dan de efficiëntie van een Carnot motor.
- E) Ja, er is niets verkeerd met de bewering van de fabrikant want $100\text{ J} = 20\text{ J} + 80\text{ J}$.

Koelmachines en Warmtepompen

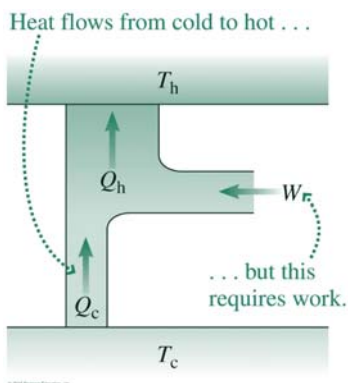


© Johan D'heer

1

Koelmachines en Warmtepompen

- Koelkasten, airconditioners en warmtepompen zijn voorbeelden van toestellen die via een cyclisch proces energie transporteren van een koud voorwerp naar een warmer voorwerp.
 - Volgens de Clausius formulering van de tweede wet kan dit niet spontaan gebeuren maar is hiervoor externe arbeid nodig.



Kringproces, dus $\Delta U = 0$

zodat $Q_h = W + Q_c$

(energiebehoud)

Q_h = warmte afgestaan bij hoge T

Q_c = warmte opgenomen bij lage T

W = opgenomen arbeid

(alle grootheden hier > 0)

© Johan D'heer

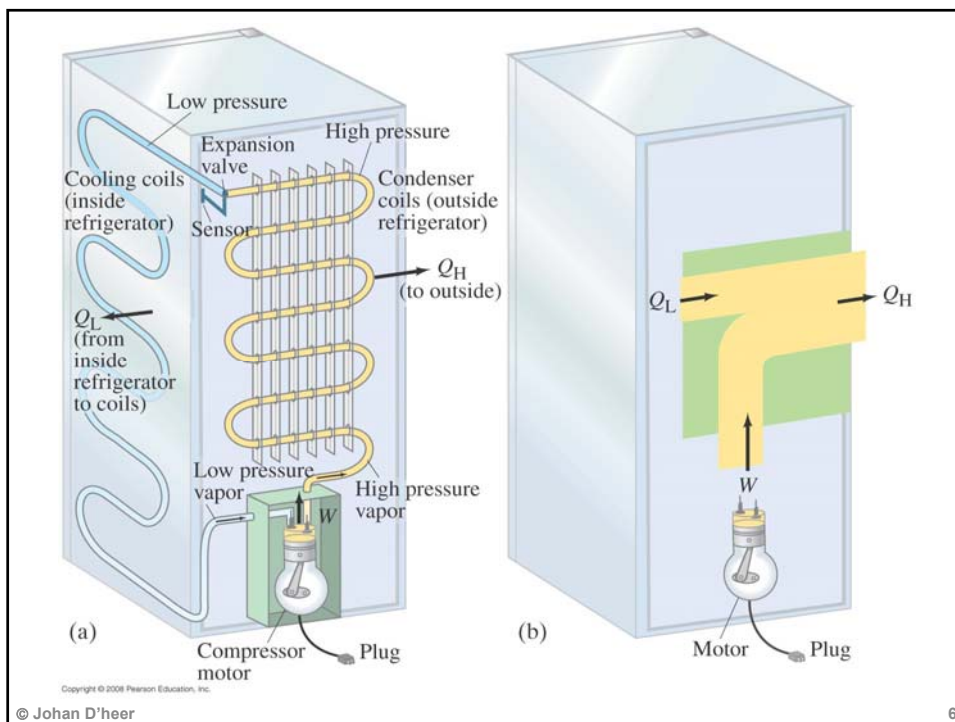
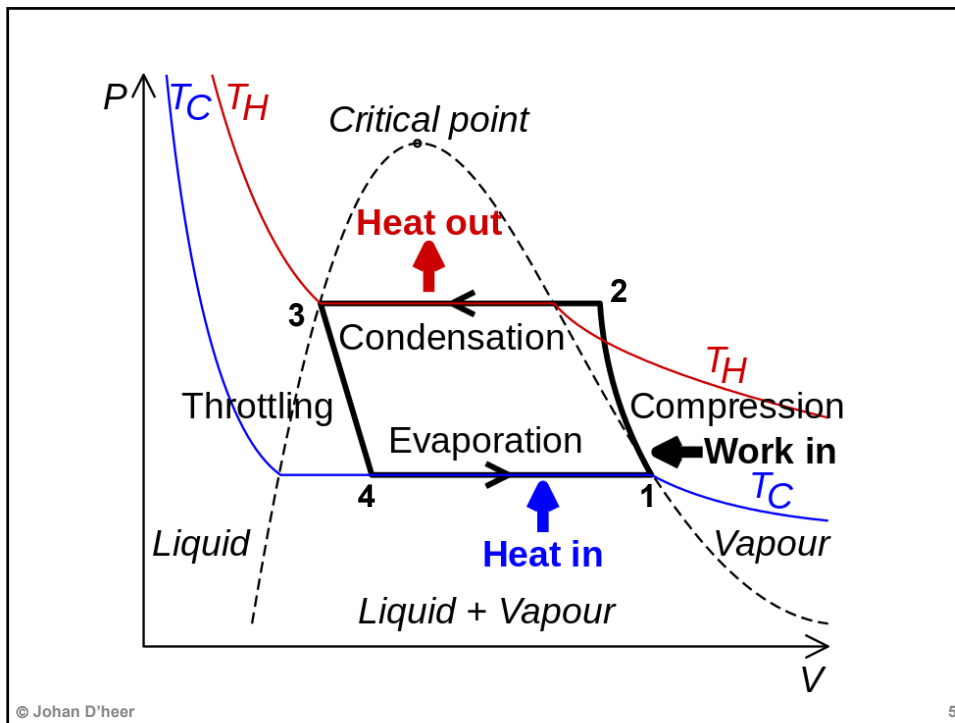
2

Koelmachines en Warmtepompen

- Warmtepompen kunnen gebruikt worden voor verwarmen en koelen:
 - Ze wisselen energie uit met de omringende lucht of, beter,
 - Met de grond waarvan de temperatuur een praktisch constante temperatuur heeft van ongeveer 10°C.
- Koelmachines (koelkasten, diepvriezers) en airconditioners worden gebruikt voor koelen:
 - Ze wisselen energie uit met de omringende lucht.
- Merk op: beide soorten toestellen verplaatsen warmte van een koud reservoir naar een reservoir op hoge temperatuur! Hiervoor is arbeid nodig!

Voorbeeld: (dampcompressie)koelkast

- Koelcyclus bestaat uit 4 processen:
 - 1-2: adiabatische compressie in een compressor
 - 2-3: isobare warmteafvoer in een condensor
 - 3-4: smoren (throttling) doorheen een expansieklep
 - 4-1: isobare warmteopname in een verdamper
- Zie ook tekst op Ufora: "19_Koelkast"



Performantiecoëfficiënt

- De performantiecoëfficiënt (coefficient of performance COP) wordt gedefinieerd als:

$$COP = \frac{\text{gewenste output}}{\text{nodige input}}$$

- Gewenste output voor een warmtepomp is, warmte afstaan:

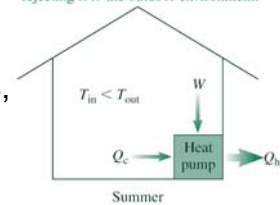
$$COP_{\text{heat pump}} = \frac{Q_h}{W} = \frac{Q_h}{Q_h - Q_c}$$

- De maximale COP is:

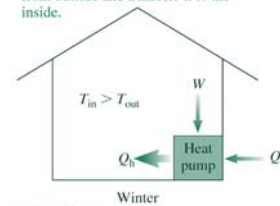
$$COP_{\text{heat pump,max}} = \frac{T_h}{T_h - T_c}$$

- Let op: alle grootheden positief!
- Max. COP geldig voor toestellen werkend op reversibele processen.

In summer the heat pump cools the house by extracting energy and rejecting it to the outdoor environment.



In winter the pump extracts energy from outside and transfers it to the inside.



© Johan D'heer

7

Performantiecoëfficiënt

- Gewenste output voor koelkast, airconditioner is warmte wegnemen:

$$COP_{\text{refrigerator}} = \frac{Q_c}{W} = \frac{Q_c}{Q_h - Q_c}$$

- De maximale COP is:

$$COP_{\text{refrigerator,max}} = \frac{T_c}{T_h - T_c}$$

- Merk op: zowel bij de warmtepomp als bij de koelkast geldt:

Hoe groter het temperatuurverschil, hoe kleiner de COP en hoe meer arbeid nodig is.

- COP zegt hoeveel W nodig om 1 Joule Q te transporteren

© Johan D'heer

8

Vraagstuk 18 hfdst. 19

- Hoeveel arbeid is nodig om met een diepvriezer met $COP = 4,1$ een hoeveelheid van 650 g water bij $0^{\circ}C$ te bevriezen?

Vraagstuk 36 hfdst. 19

- Een koelkast heeft een binnentemperatuur van $4^{\circ}C$ bij een omgevingstemperatuur van $30^{\circ}C$. Ze is niet perfect geïsoleerd en verliest warmte tegen een tempo van 340 W, (d.w.z. er stroomt warmte in de koelkast). In de onderstelling dat de koelkast werkt met reversibele processen, tegen welk tempo moet ze elektrische energie verbruiken om de binnentemperatuur constant te houden?

Vraagstuk 39 hfdst. 19

- Een warmtepomp haalt warmte uit grondwater van 10°C en transfereert deze in water van 90°C . Bereken:
 - (a) de COP.
 - (b) het elektrisch verbruik als de warmtepomp warmte transfereert tegen een tempo van 20 KW.
 - (c) Vergelijk de kost van de warmtepomp met deze van een stookoliebrander. Kostprijs elektriciteit is $0,0155 \text{ \$/kWu}$. Stookolie kost $\$2,60/\text{gallon}$ en levert 30 kWu/gallon warmte.