

# THERMODYNAMISCHE PROCESSEN

Prof. dr. Frederik Ronsse

Bachelor of Science in de bio-ingenieurswetenschappen  
Academiejaar 2019 – 2020



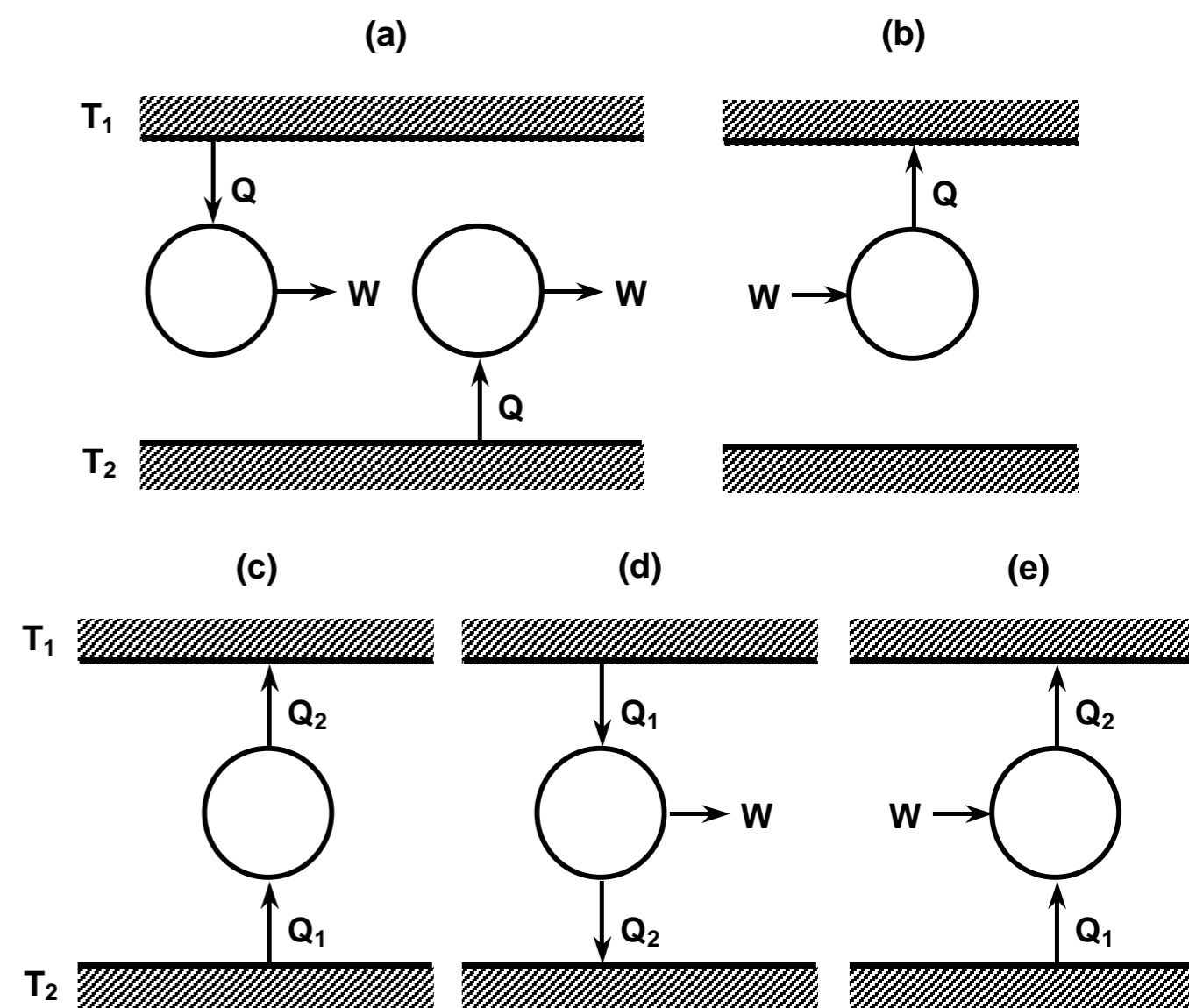
# THERMODYNAMISCHE PROCESSEN – AJ '19-'20

## H3: PROCESSEN OP IDEALE GASSEN – DEEL 2

Prof. dr. ir. Frederik Ronsse

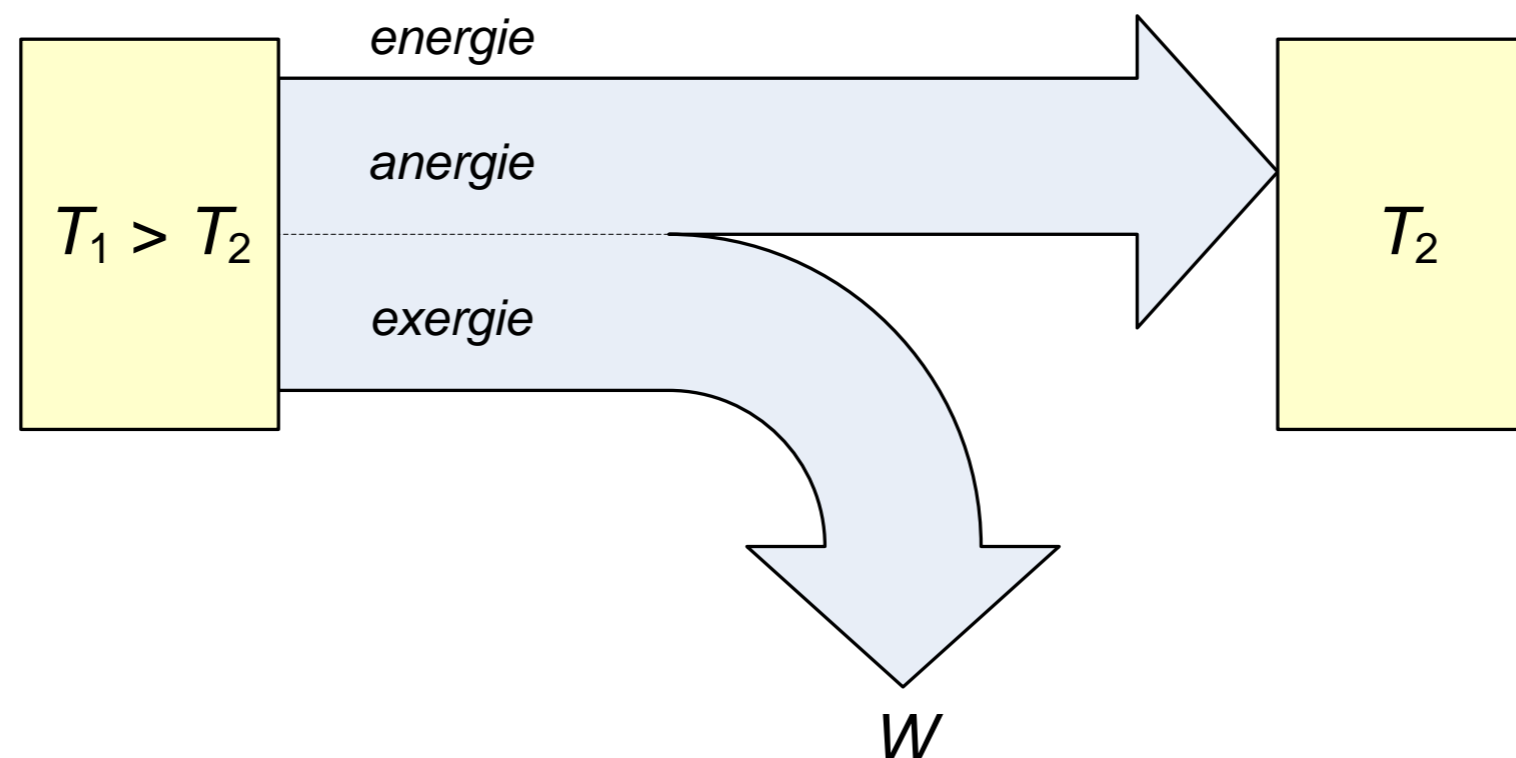
## 3.7. TWEEDE HOOFDWET

- Voor gesloten, stationaire systemen (koelsystemen, bijv.)
  - Uit 1ste hoofdwet volgt: alle warmte kan omgezet worden tot arbeid (fig. a)
  - De 2de hoofdwet stelt: **bij een kringcyclus, slechts een deel van de warmte kan in arbeid worden omgezet, het overige deel moet terug worden afgegeven aan een reservoir op lagere  $T$**
- *Anders uitgedrukt*: warmte kan op zichzelf (spontaan) niet van lagere naar hogere temperatuur vloeien (*fig. c* is onmogelijk)
- Wel mogelijk:
  - *Fig. d*: Thermische motoren (inwendige verbrandingsmotoren, Stirlingmotoren): Warmtestroom van hoge naar lage  $T$ , met vrijstelling arbeid
  - *Fig. e*: Koelmachines en warmtepompen: Warmtestroom van lage naar hoge  $T$ , mits opname arbeid



## 3.7. TWEEDE HOOFDWET

- De energie die nuttig kan omgezet worden in arbeid = **exergie**
- **Energie = exergie + anergie**
- **Anergie** = nutteloze energie
- Bemerk dat exergie hoeveelheid afhangt van  $T_2$  !
- 2<sup>de</sup> hoofdwet betekent dus dat er bij omzetting van energie naar arbeid steeds anergie gevormd wordt (wanorde neemt toe → entropie, zie later)



## 3.8. HET CARNOT KRINGPROCES

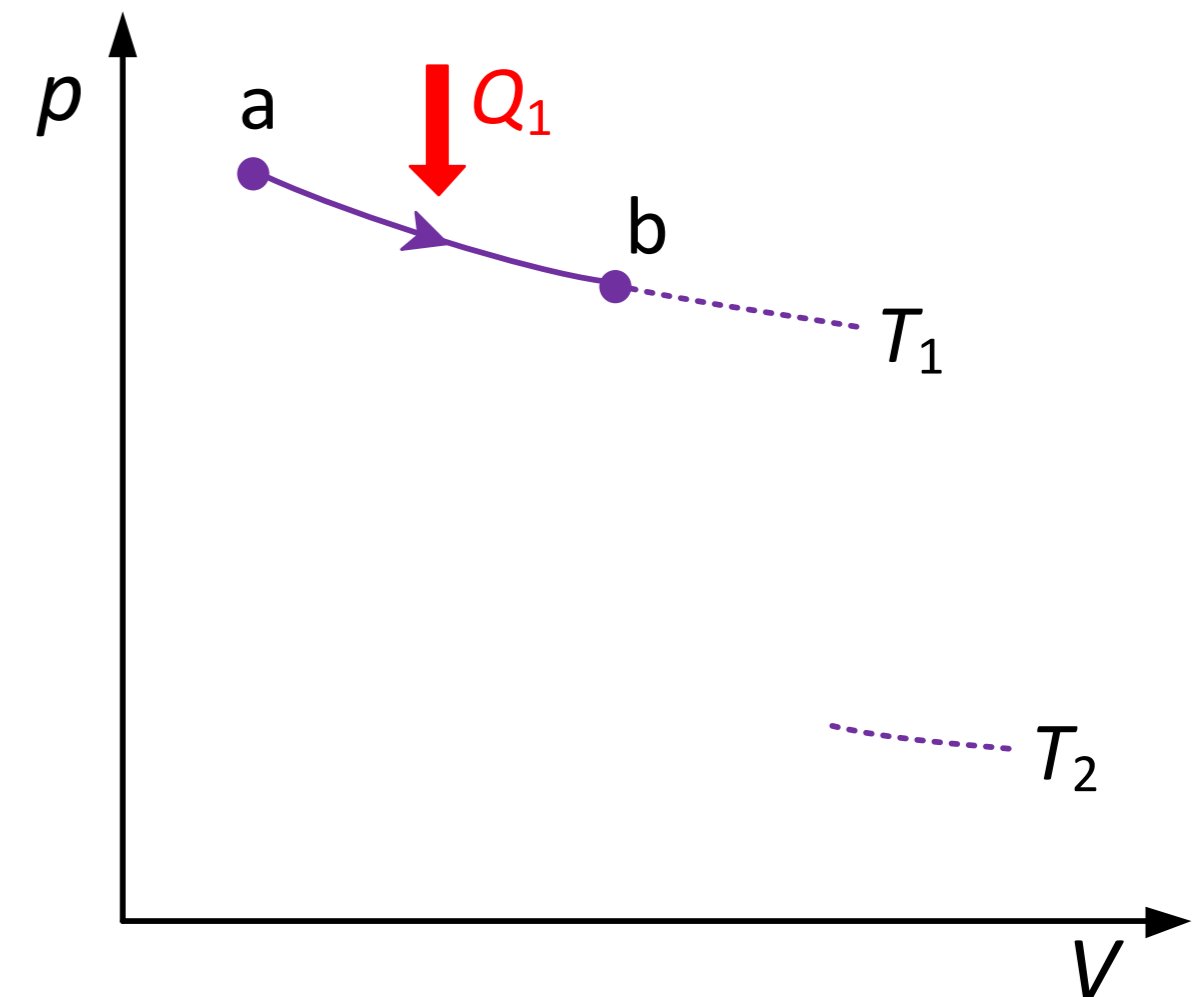
- Samengesteld uit 4 processen:
  - 1. Reversibele isotherme expansie (traject  $ab$ )
  - Soortelijk volume neemt toe van  $v_1$  naar  $v_2$
  - Er wordt expansiewerk geleverd aan de omgeving:  $W_1$
  - Opname van  $Q_1$  bij constante temperatuur  $T_1$
  - Bij ideale gassen: inwendige energie enkel  $\sim T \Rightarrow \Delta U = 0$
  - Dus, volgens 1<sup>ste</sup> hoofdwet:

$$Q_1 = W_1 \quad \longrightarrow \quad Q_1 = W_1 = \int_a^b p \cdot dV$$

(opp. onder  $ab$  in  $p, V$ -diagram)

- Bij ideale gassen geldt:  $p \cdot V = n \cdot R \cdot T$  of,

$$Q_1 = W_1 = n \cdot R \cdot T_1 \cdot \int_a^b \frac{dV}{V} = n \cdot R \cdot T_1 \cdot \ln \left( \frac{V_2}{V_1} \right) \quad \longrightarrow \quad \frac{Q_1}{T_1} = -n \cdot R \cdot \ln \left( \frac{V_1}{V_2} \right)$$

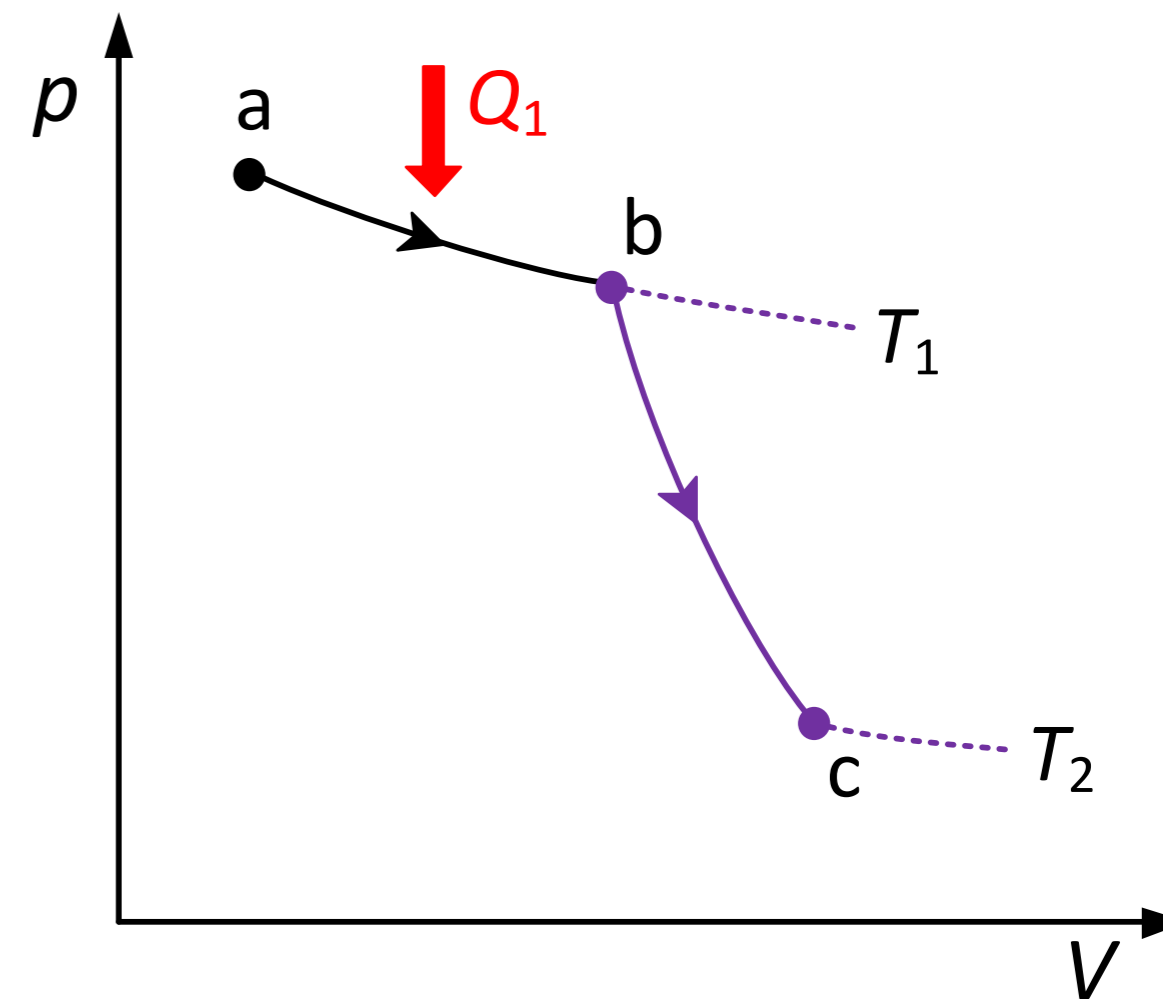


## 3.8. HET CARNOT KRINGPROCES

- Samengesteld uit 4 processen:
  - 2. Reversibele adiabatische expansie (traject  $bc$ )
  - Geen uitwisseling van warmte met omgeving
  - Afname van de temperatuur van  $T_1$  naar  $T_2$ , verandering in inw. energie:

$$dU = -\delta W$$

- De arbeid is oppervlak onder traject  $bc$

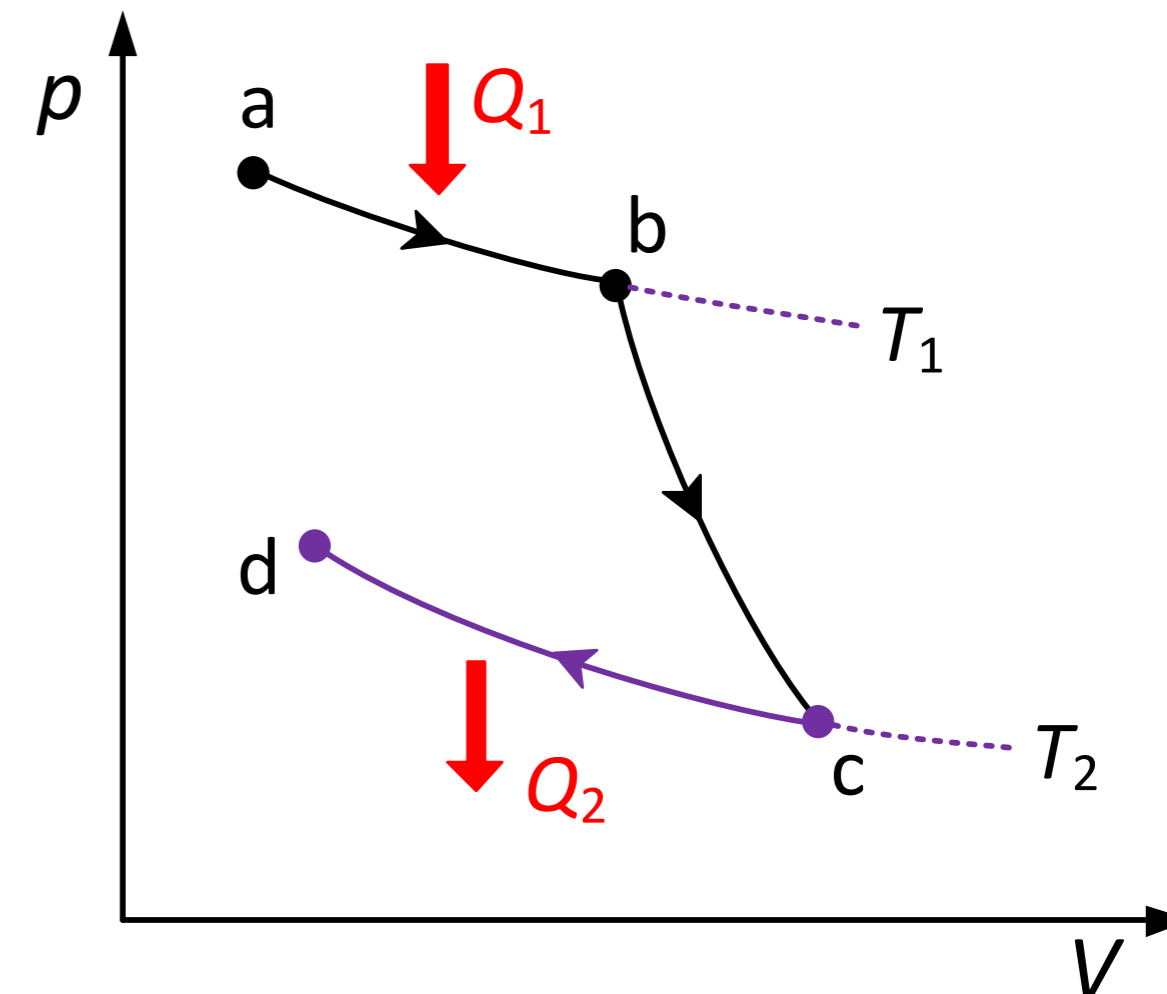


## 3.8. HET CARNOT KRINGPROCES

- Samengesteld uit 4 processen:
  - 4. Reversibele isotherme compressie (traject  $cd$ )
  - Soortelijk volume neemt af van  $v_3$  naar  $v_4$
  - Er wordt compressiearbeid geleverd aan het systeem:  $W_2$
  - Vrijstelling van  $Q_2$  bij constante temperatuur  $T_2$  ( $< T_1$ )
  - Bij ideale gassen: inwendige energie enkel  $\sim T \Rightarrow \Delta U = 0$
  - Dus, volgens 1ste hoofdwet (bij ideale gassen):

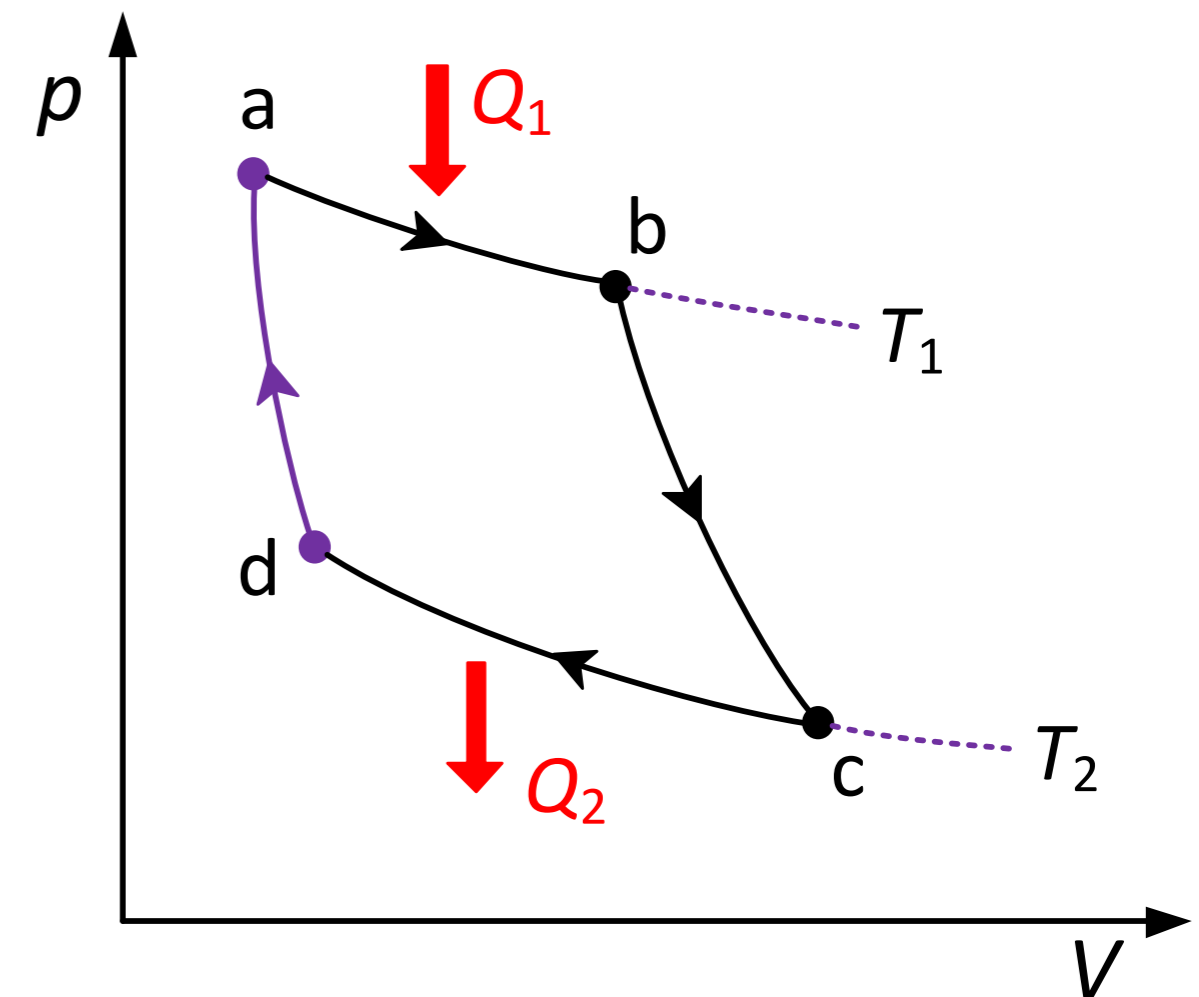
$$Q_2 = W_2 = n \cdot R \cdot T_2 \cdot \int_c^d \frac{dV}{V} = n \cdot R \cdot T_2 \cdot \ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right)$$

$$\frac{Q_2}{T_2} = n \cdot R \cdot \ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right)$$



## 3.8. HET CARNOT KRINGPROCES

- Samengesteld uit 4 processen:
  - 4. Reversibele adiabatische compressie (traject  $da$ )
  - Geen uitwisseling van warmte met omgeving
  - Toename van de temperatuur van  $T_2$  naar  $T_1$ , verandering in inw. energie:
$$dU = \delta W$$
  - Bemerk dat de opgenomen arbeid in  $da$  gelijk is aan de geproduceerde arbeid in  $bc$  (gezien  $\Delta U$  voor beide trajecten even groot is)





## 3.8. HET CARNOT KRINGPROCES

- Volledige kringloop

- er geldt,

$$\Delta U = 0 \quad \text{of} \quad Q_1 + Q_2 = W_1 + W_2$$

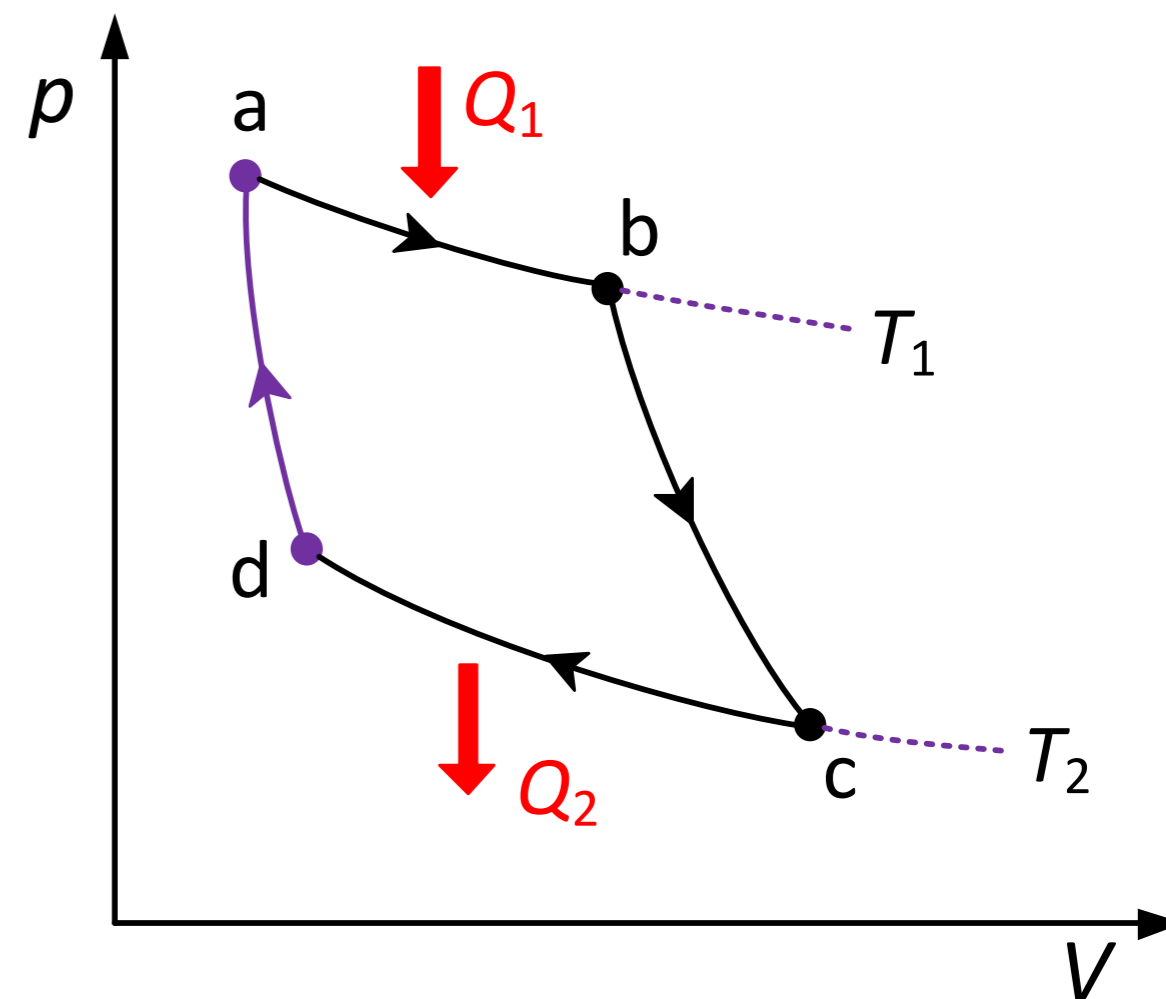
*Respecteer teken!!*

- Netto effect = warmte-opname vanuit  $T_1$  en afgifte naar  $T_2$ , verschil is netto arbeid die wordt geproduceerd ( $W_1 + W_2 > 0$ )
- Voor de reversibele compressie en expansie geldt,

$$\frac{V_3}{V_2} = \frac{V_4}{V_1} \quad \text{of} \quad \frac{V_1}{V_2} = \frac{V_4}{V_3}$$

- Zodat:

$$\frac{Q_1}{T_1} = -\frac{Q_2}{T_2} \quad \text{of} \quad \frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} = 0$$

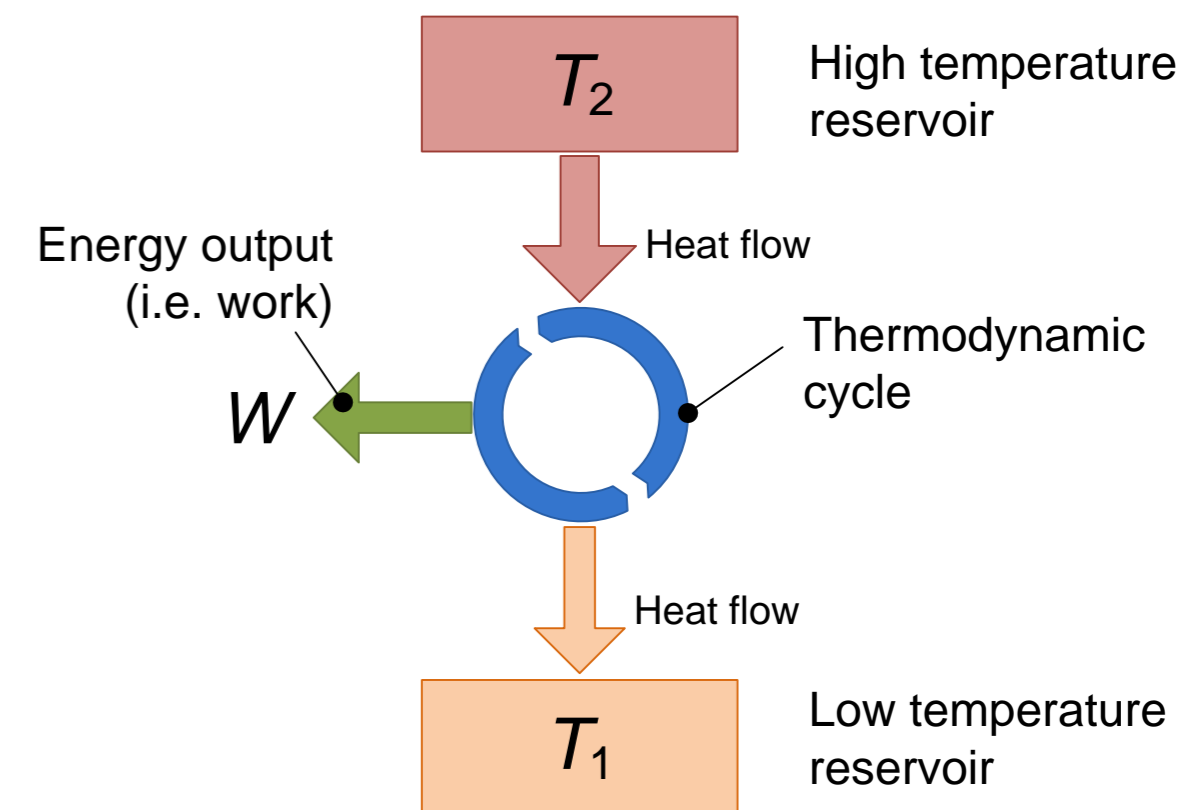


## 3.8. HET CARNOT KRINGPROCES

- De Carnotfactor:
  - Ook wel efficiëntie: is de hoeveelheid opgenomen warmte door de cyclus ( $= Q_1$ ), tov. de geleverde arbeid ( $= W$ ), in abs. waarden,

$$\varepsilon_c = \frac{W}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

- Bemerk dat dergelijke definities van efficiëntie (**verhouding nuttig effect tot opgenomen warmte**) ook later in andere kringprocessen zullen gehanteerd worden.
- De Carnotfactor is de (theoretisch) hoogst haalbare efficiëntie, geen enkel ander proces is meer efficiënt !
- Bewijs uit ongerijmde



## 3.8. HET CARNOT KRINGPROCES

- De Carnotfactor:

- Stel een tweede cyclus waarbij (cyclus  $K$ ) die wel efficiënter zou zijn:

$$\frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} > \frac{Q'_1 - Q'_2}{Q'_1}$$

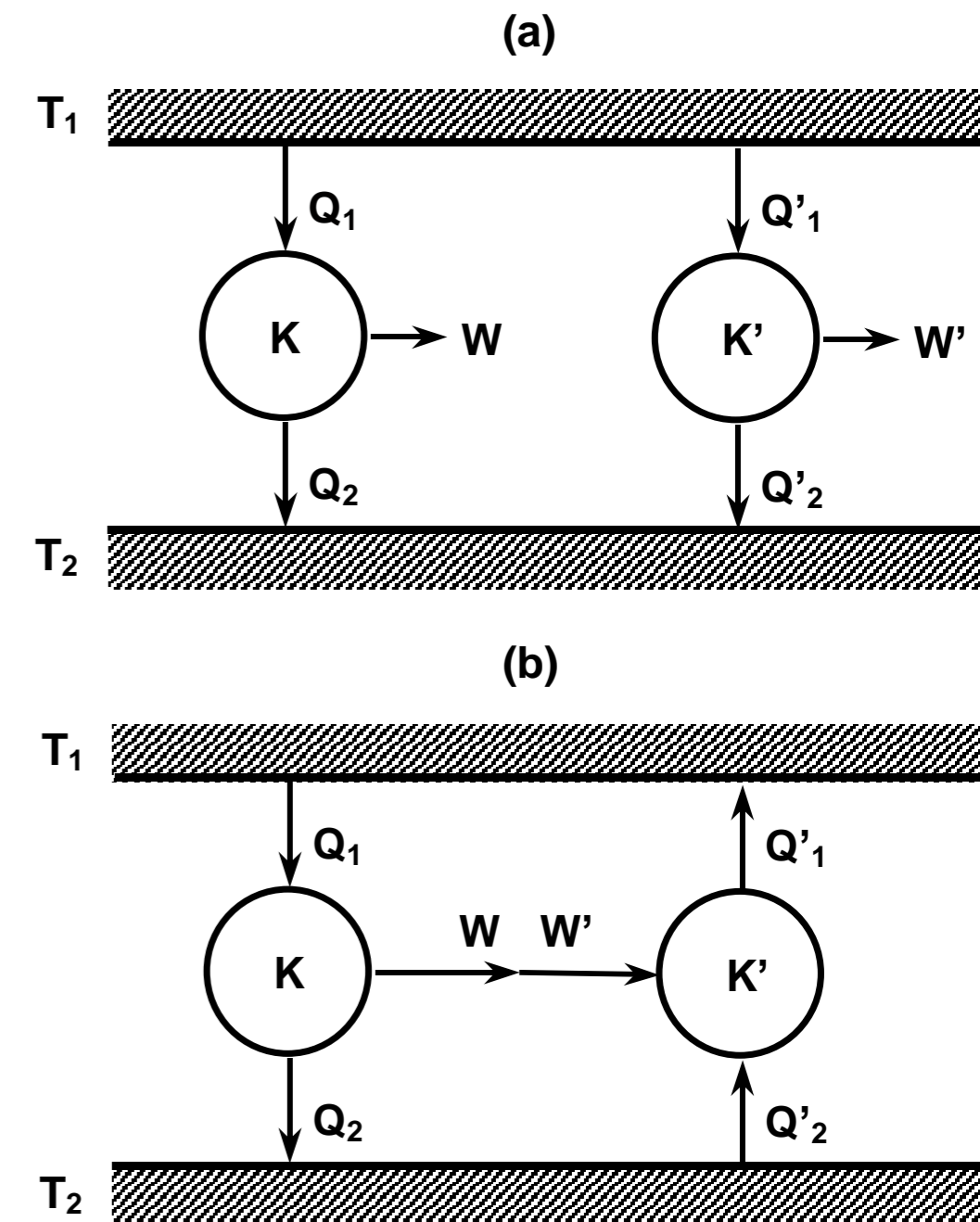
- Stel dat we  $K'$  (Carnotcyclus) omkeren en aandrijven met de arbeid uit  $K$ :

$$W = W' = Q_1 - Q_2 = Q'_1 - Q'_2$$

- Dus volgt:

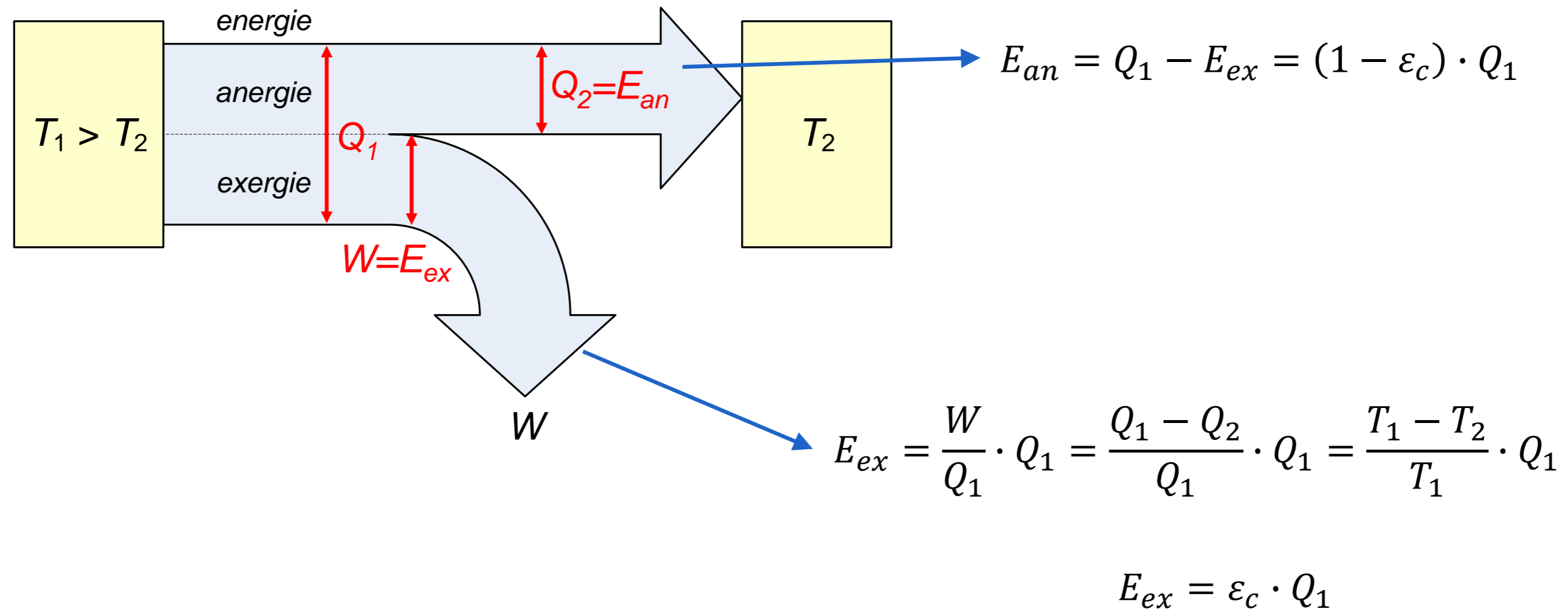
$$Q'_1 > Q_1$$

- Dus een samengestelde machine  $K + K'$  zou netto en spontaan warmte van lage ( $T_2$ ) naar hoge ( $T_1$ ) temperatuur verpompen
- In strijd met de 2de hoofdwet. De initiële veronderstelling ( $\varepsilon_c < \varepsilon'_c$ ) is onmogelijk. **Besluit: De Carnotfactor is maximaal**



## 3.8. HET CARNOT KRINGPROCES

- De Carnotfactor:
  - Laat gemakkelijk toe om exergie en anergie te berekenen



## 3.9. ENTROPIE

- Reeds werd aangetoond voor de Carnotcyclus dat (teken respecterende !),

$$\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} = 0$$

- Iedere willekeurige, omkeerbare kringloop kan beschouwd worden als **samengesteld** uit Carnotcycli.

- Bij al deze Carnotcycli geldt steeds dat,

$$\sum \frac{Q}{T} = 0$$

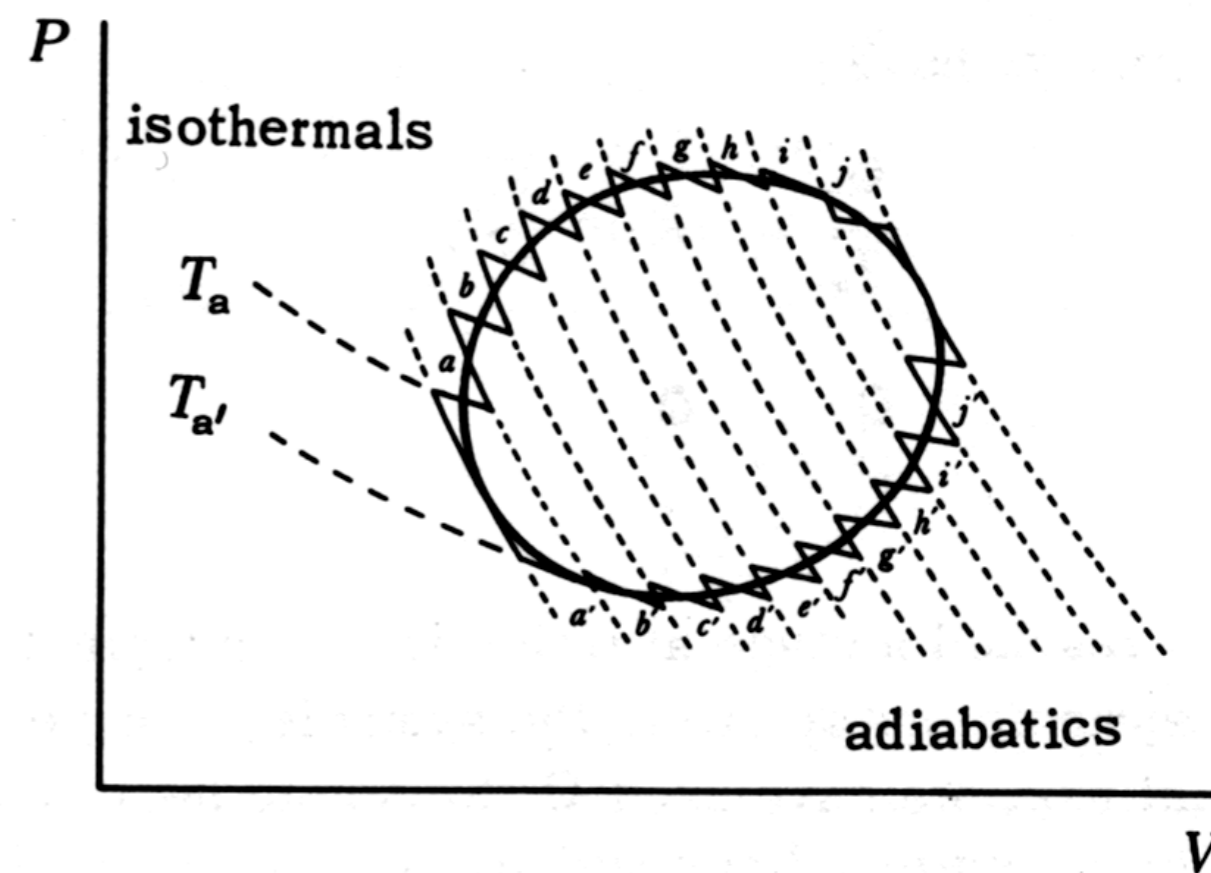
- Of bij een oneindig aantal Carnotcycli,

$$\oint \frac{\delta Q}{T} = 0$$

- Voor iedere Carnotcyclus is deze integraal nul, dus de grootheid S is onafhankelijk van de gevolgde weg in het toestandsdiagram: Deze **toestandsgrootheid** wordt gedefinieerd als de entropie:

$$dS = \frac{\delta Q}{T}$$

- Entropie wordt uitgedrukt ten opzichte van een referentie (praktijk: entropieveranderingen), is een toestandsgrootheid en kan uit andere toestandsgrootheden worden berekend



## 3.9. ENTROPIE

- Entropie in een (reversibel) niet-adiabatisch, gesloten systeem
  - Er geldt (1ste hoofdwet):

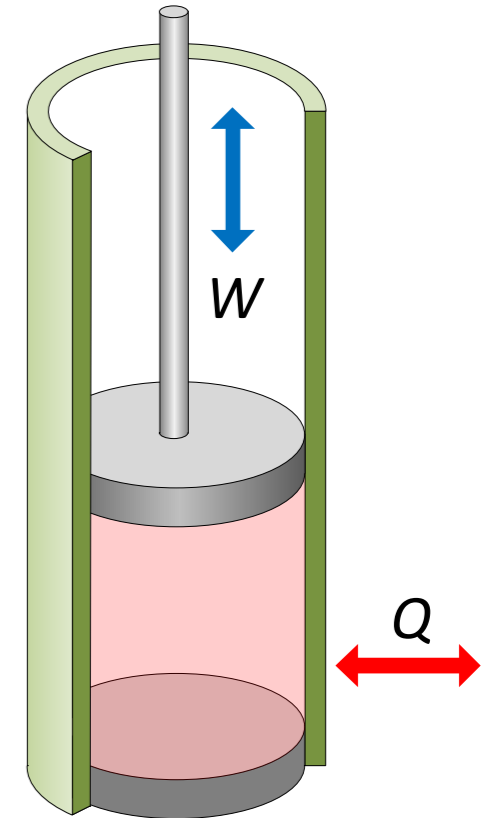
$$dU = \delta Q - p \cdot dV$$

- En met  $H = U + p \cdot V$ :

$$dS = \frac{\delta Q}{T} = \frac{dU + p \cdot dV}{T} = \frac{dH - V \cdot dp}{T}$$

- Is integreerbaar, entropieverschil kan als volgt berekend worden,

$$T \cdot dS = dU + p \cdot dV = dH - V \cdot dp$$
$$\int_1^2 T \cdot dS = U_2 - U_1 + \int_1^2 p \cdot dV = H_2 - H_1 - \int_1^2 V \cdot dp$$



## 3.9. ENTROPIE

- Entropie in een adiabatisch systeem

- Geen warmte-uitwisseling, de eerste hoofdwet herleidt zich tot (als **reversibel**),

$$dU = -\delta W = -p \cdot dV$$

- Stel dat het proces **niet-reversibel** is

$$dU = -\delta W = -p \cdot dV + |\delta W_w|$$

- Wrijvingsarbeid ( $\delta W_w$ ) levert een **negatieve** bijdrage: er wordt arbeid uit omgeving opgenomen (of  $p, V$  arbeid in mindering gebracht) en omgezet in inwendige energie

- Voor entropie geldt:

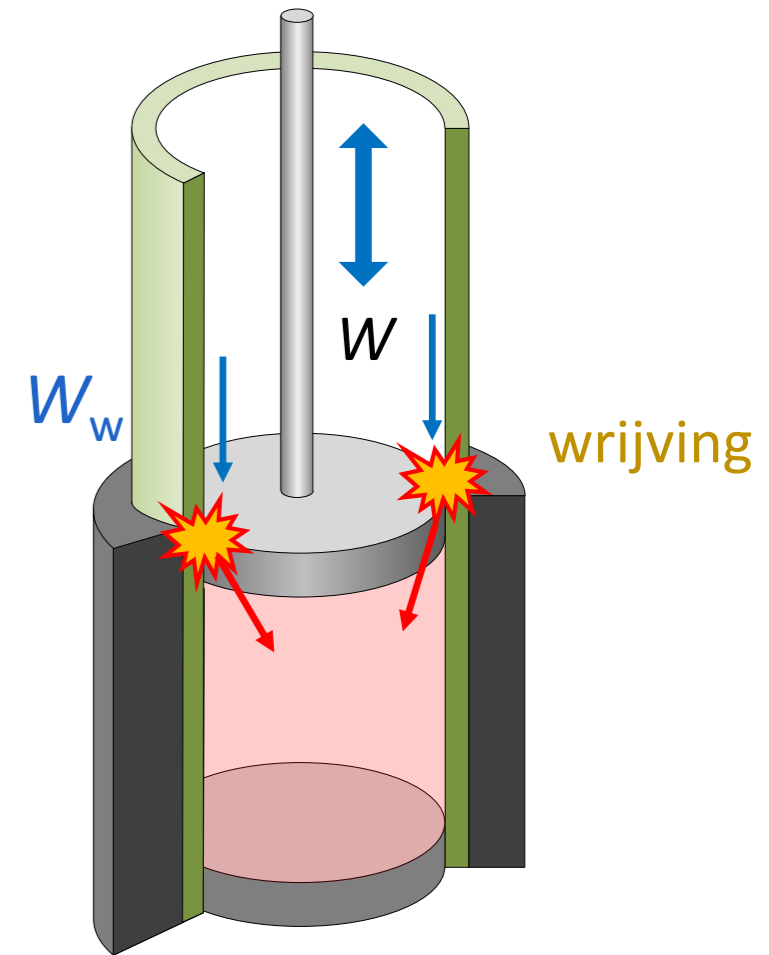
$$dS = \frac{\delta Q}{T} = \frac{dU + p \cdot dV}{T}$$

$$dS = 0$$

reversibel

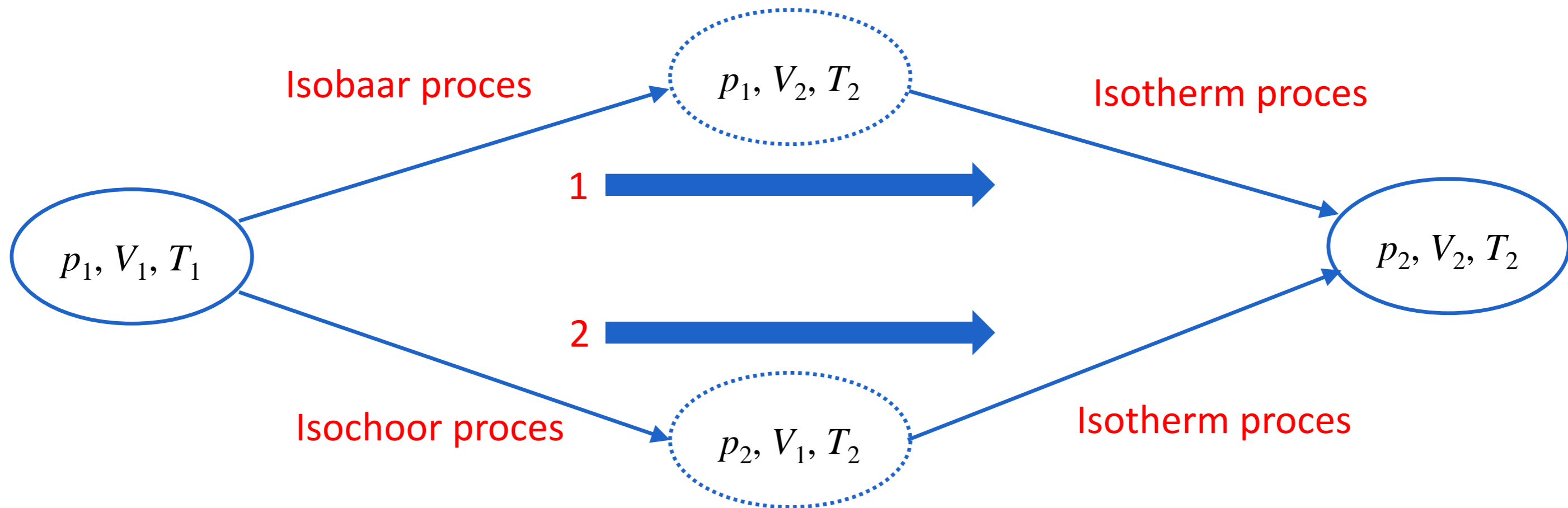
$$dS = \frac{|\delta W_w|}{T} > 0$$

niet-reversibel



## 3.9. ENTROPIE

- Entropie van een willekeurig proces (ideale gassen)





## 3.9. ENTROPIE

- Entropie van een willekeurig proces (ideale gassen): route 1

- Entropie is (bij isotherme processen),

$$dS = \frac{dQ}{T} = \frac{dW}{T} = p \cdot \frac{dV}{T} = -n \cdot R \cdot \frac{dp}{p}$$

- Kan ook geschreven worden als

$$dS = \left( \frac{\partial S}{\partial T} \right)_p \cdot dT + \left( \frac{\partial S}{\partial p} \right)_T \cdot dp = \left( \frac{C_p}{T} \right) \cdot dT - \left( \frac{n \cdot R}{p} \right) \cdot dp$$

- Wat na integratie oplevert,

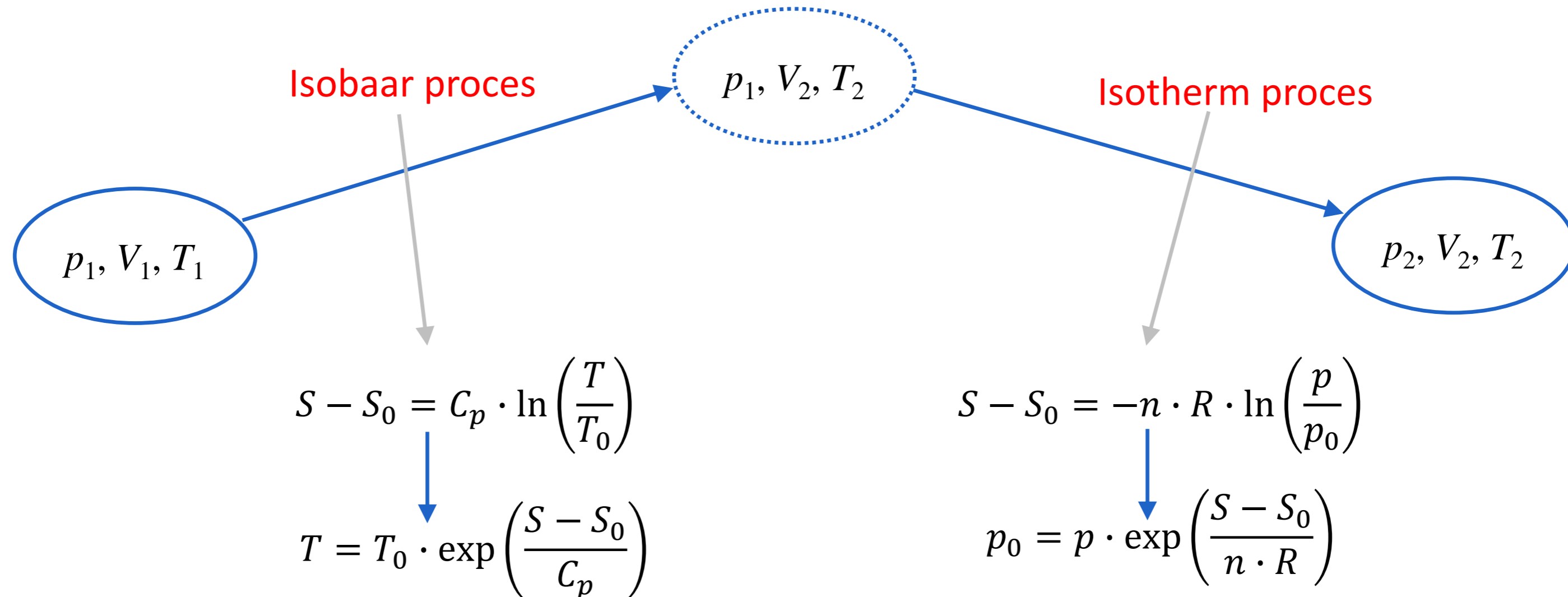
$$\Delta S = S - S_0 = C_p \cdot \ln \left( \frac{T}{T_0} \right) - n \cdot R \cdot \ln \left( \frac{p}{p_0} \right)$$

Stijgende  
temperatuur geeft  
entropiestijging

Stijgende druk  
geeft  
entropiedaling

## 3.9. ENTROPIE

- Entropie van een willekeurig proces (ideale gassen): route 1
  - Op basis van de voorgaande vergelijkingen



- Bemerk in bovenstaande vergelijkingen kan je met subscripten 1 en 2 werken voor de volledigheid

## 3.9. ENTROPIE

- Entropie van een willekeurig proces (ideale gassen): route 2

- Entropie is (bij isotherme processen – constante temperatuur),

$$dS = \frac{dQ}{T} = \frac{dW}{T} = p \cdot \frac{dV}{T} = n \cdot R \cdot \frac{dV}{V}$$

- Kan ook geschreven worden als

$$dS = \left( \frac{\partial S}{\partial T} \right)_V \cdot dT + \left( \frac{\partial S}{\partial V} \right)_T \cdot dV = \left( \frac{C_V}{T} \right) \cdot dT + \left( \frac{n \cdot R}{V} \right) \cdot dV$$

- Wat na integratie oplevert,

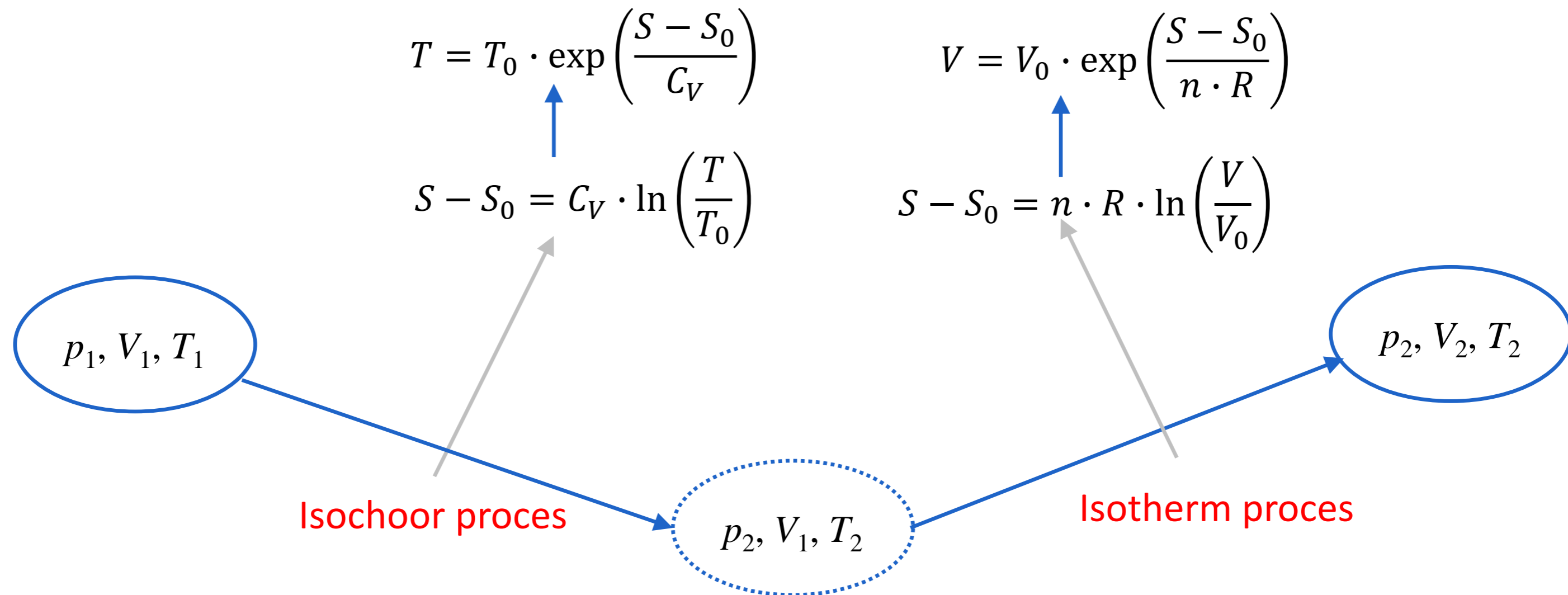
$$\Delta S = S - S_0 = C_V \cdot \ln \left( \frac{T}{T_0} \right) + n \cdot R \cdot \ln \left( \frac{V}{V_0} \right)$$

Stijgende  
temperatuur geeft  
entropiestijging

Stijgende volume  
geeft  
entropiestijging

## 3.9. ENTROPIE

- Entropie van een willekeurig proces (ideale gassen): route 2
  - Op basis van de voorgaande vergelijkingen



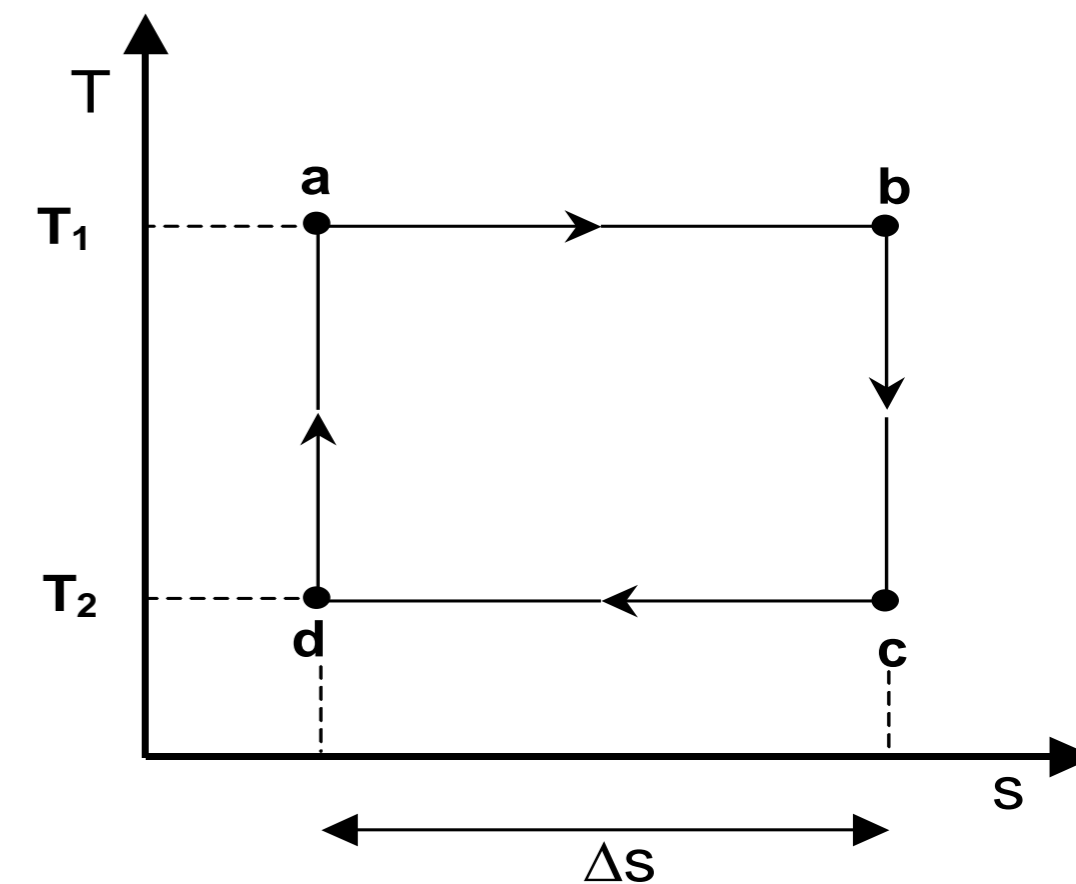
- Bemerk in bovenstaande vergelijkingen kan je met subscripten 1 en 2 werken voor de volledigheid

## 3.9. TOESTANDSDIAGRAMMEN

- Het  $T,s$ -diagram:

- Isothermen zijn horizontaal
- Adiabaten (isentropen) liggen verticaal
- Het Carnot kringproces is een rechthoek, en arbeid is het omsloten oppervlak:

$$w = q_1 - q_2 = \int_a^b T_1 \cdot ds - \int_d^c T_2 \cdot ds = T_1 \cdot \Delta s - T_2 \cdot \Delta s = (T_1 - T_2) \cdot \Delta s$$



- Ligging van isobaren:

$$\delta q = T \cdot ds = c_p \cdot dT \quad \text{of} \quad \frac{dT}{ds} = \frac{T}{c_p}$$

Geeft richtingscoëfficiënt van raaklijnen aan de isobare in  $T,s$ -diagram

$$s - s_0 = c_p \cdot \ln\left(\frac{T}{T_0}\right) \quad \text{en} \quad T = T_0 \cdot \exp\left(\frac{s - s_0}{c_p}\right)$$

## 3.9. TOESTANDSDIAGRAMMEN

- Het  $T,s$ -diagram:

- Ligging van isobaren:

$$\delta q = T \cdot ds = c_p \cdot dT \quad \text{of} \quad \left( \frac{dT}{ds} = \frac{T}{c_p} \right) \rightarrow \text{Geeft richtingscoëfficiënt van raaklijnen aan de isobare in } T,s\text{-diagram}$$

- Ligging van isochoren

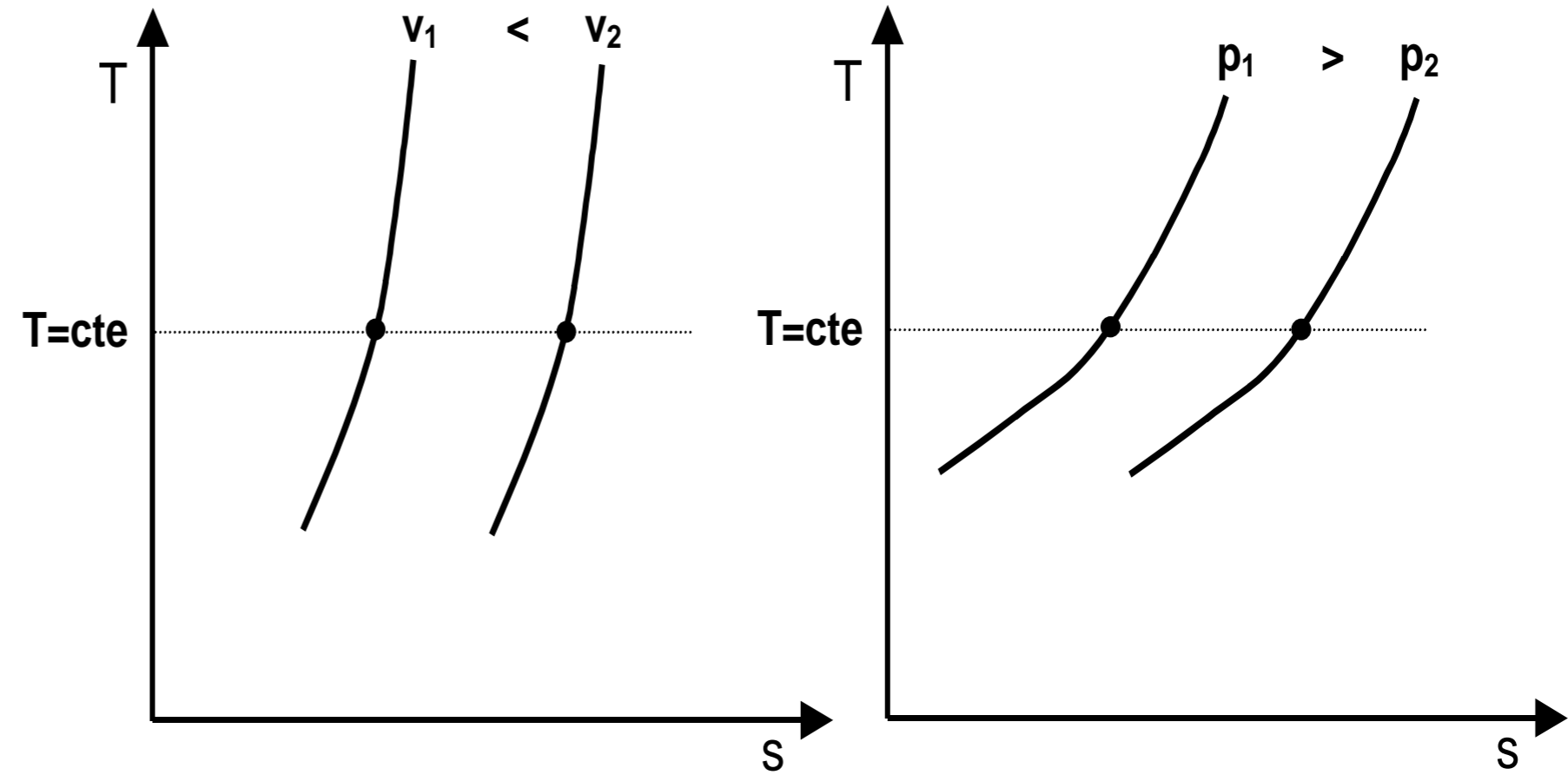
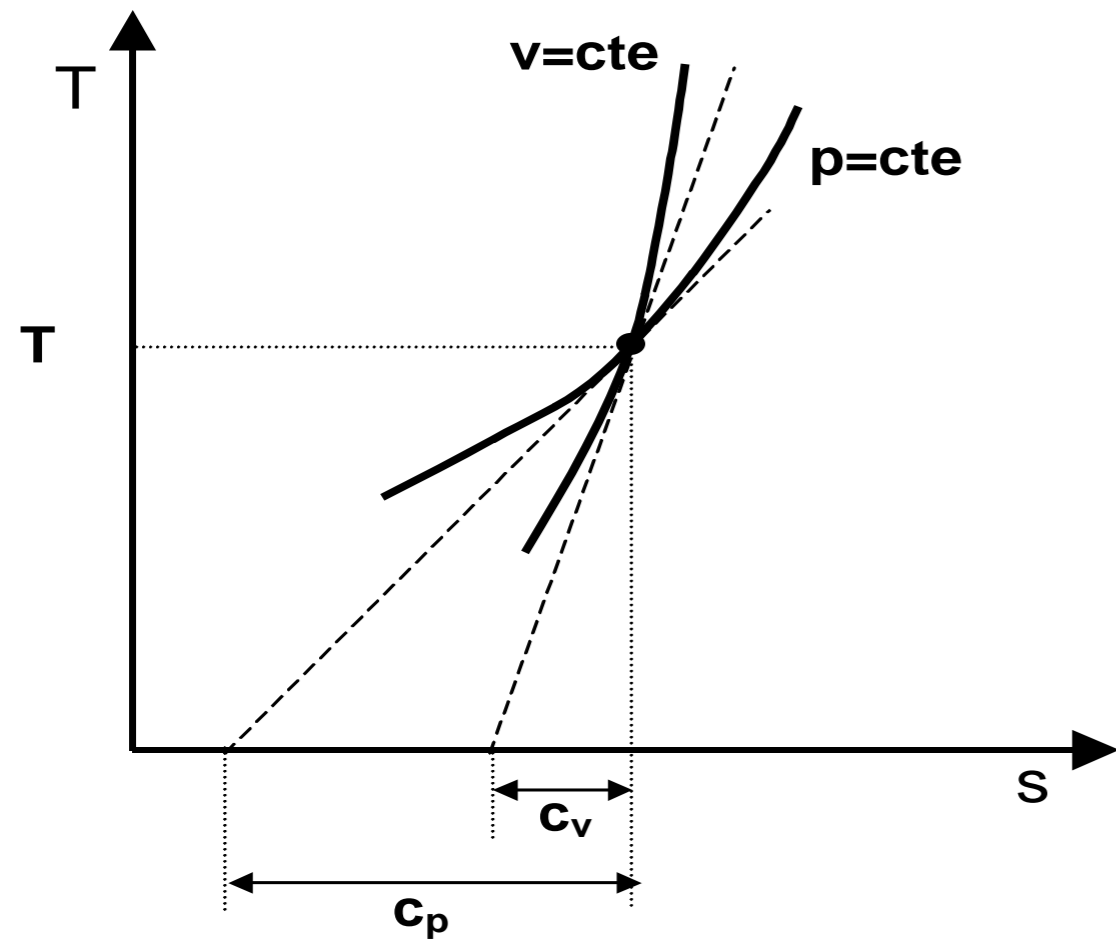
$$\delta q = T \cdot ds = c_v \cdot dT \quad \text{of} \quad \left( \frac{dT}{ds} = \frac{T}{c_v} \right) \rightarrow \text{Geeft richtingscoëfficiënt van raaklijnen aan de isochore in } T,s\text{-diagram}$$

$$s - s_0 = c_v \cdot \ln\left(\frac{T}{T_0}\right) \quad \text{en} \quad T = T_0 \cdot \exp\left(\frac{s - s_0}{c_v}\right)$$

- Gezien  $c_p > c_v$  is de helling een isochore groter dan een isobare in een gegeven  $(T, s)$  punt

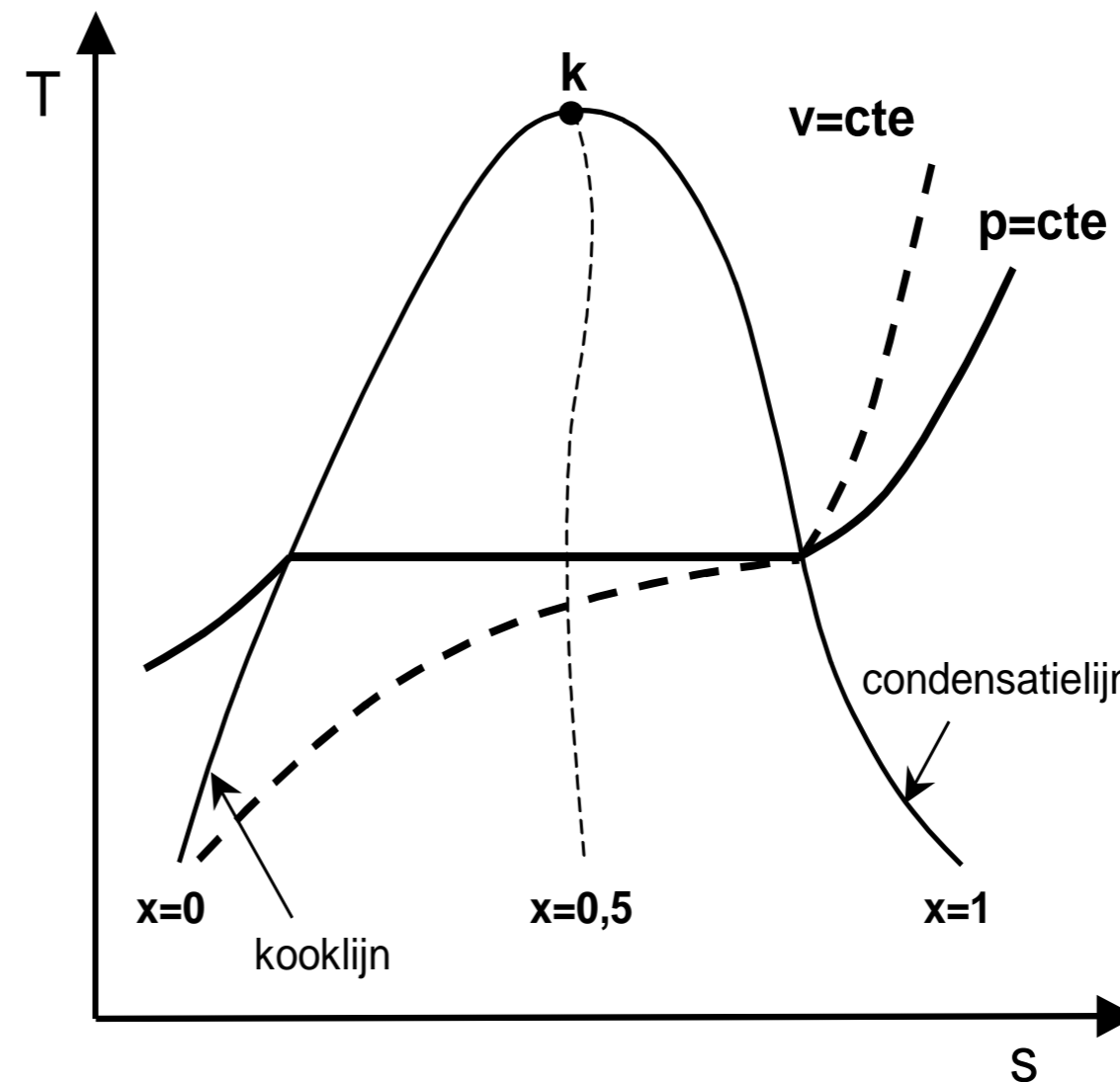
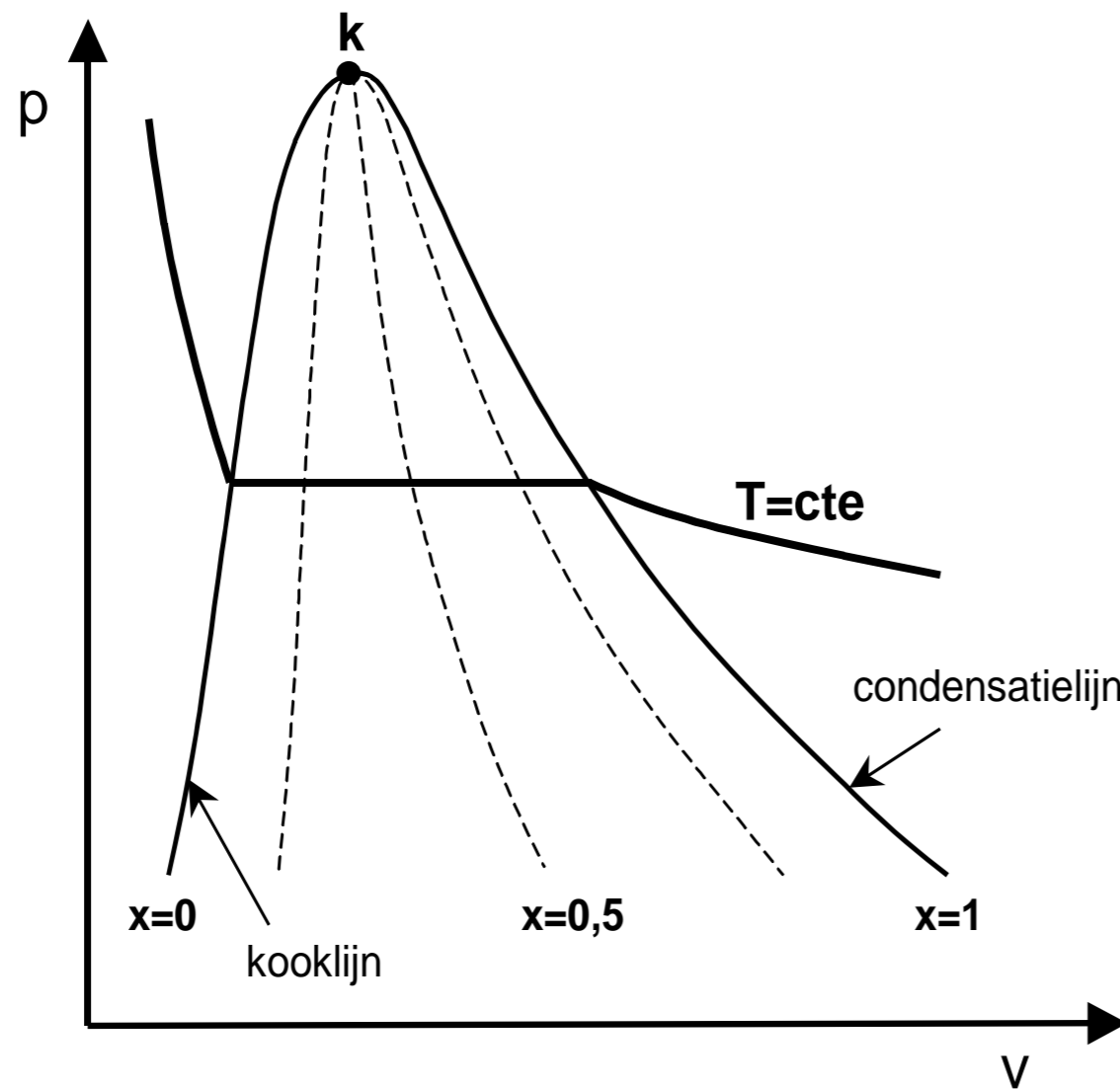
# 3.9. TOESTANDSDIAGRAMMEN

- Het  $T,s$ -diagram:
  - Isobaren en isochoren:



# 3.9. TOESTANDSDIAGRAMMEN

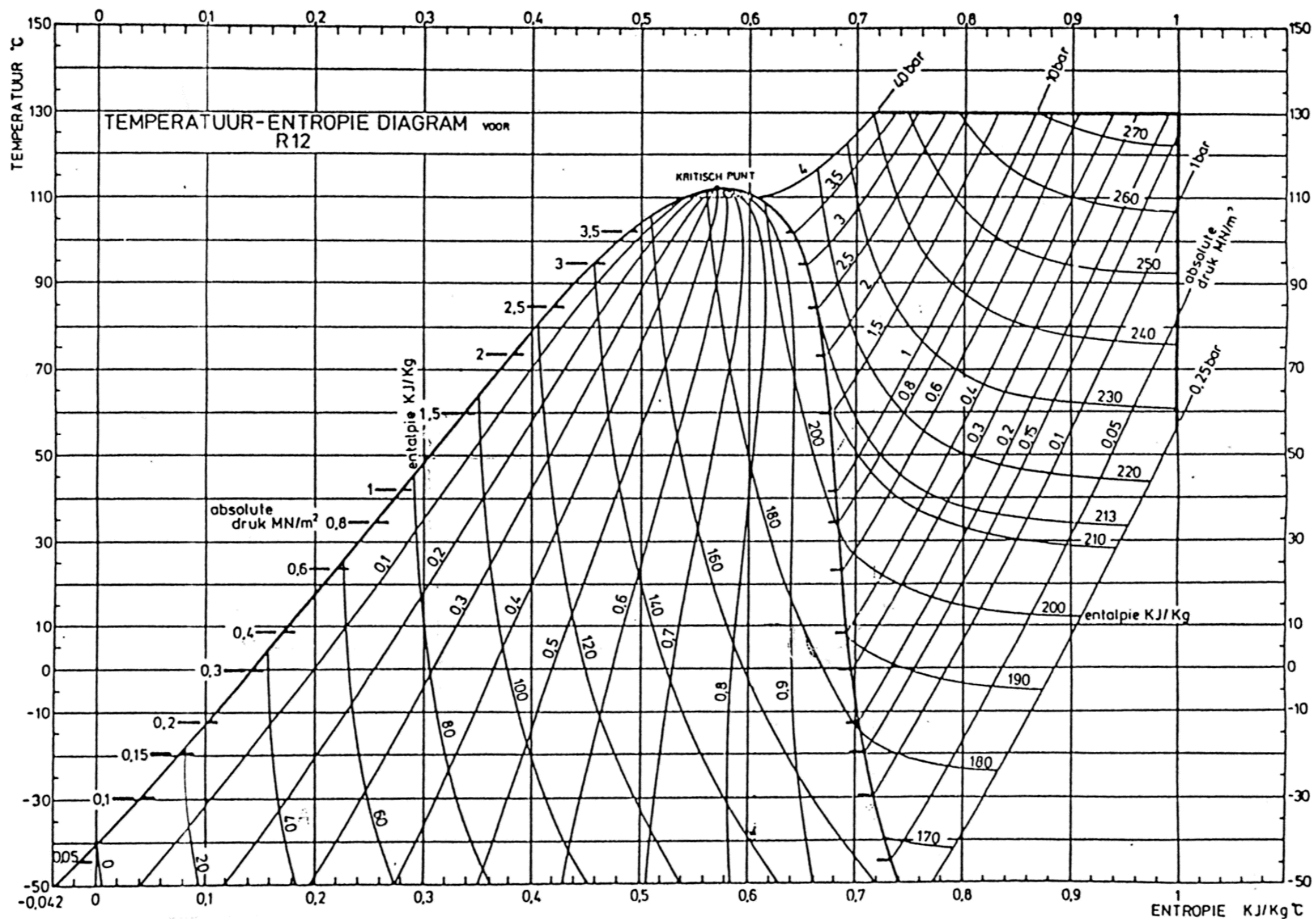
- Het  $T,s$ -diagram:
  - Wat bij een niet-ideaal gas ?





# 3.9. TOESTANDSDIAGRAMMEN

- Het  $T,s$ -diagram:
  - Wat bij een niet-ideaal gas ?



## 3.9. TOESTANDSDIAGRAMMEN

- Het  $h,s$ -diagram:

- Isenthalpen zijn horizontaal
- Isentropen liggen verticaal
- Ligging van isobaren:

$$dH = T \cdot dS + V \cdot dp$$



Isobaren,  $dp = 0$

$$h = h_0 + c_p \cdot (T - T_0)$$

$$T = T_0 \cdot \exp\left(\frac{s - s_0}{c_p}\right)$$

Reeds afgeleid

$$h = (h_0 - c_p \cdot T_0) + C_p \cdot T_0 \cdot \exp\left(\frac{s - s_0}{c_p}\right)$$

De isobaren verlopen dus exponentieel

## 3.9. TOESTANDSDIAGRAMMEN

- Het  $h,s$ -diagram:
  - Isenthalpen zijn horizontaal
  - Isentropen liggen verticaal
  - Ligging van isothermen:

$$\left(\frac{\partial H}{\partial S}\right)_T = \frac{\left(\frac{\partial H}{\partial p}\right)_T}{\left(\frac{\partial S}{\partial p}\right)_T} = \left(\frac{\partial h}{\partial s}\right)_T = 0 \longrightarrow \text{Isothermen liggen dus horizontaal !}$$

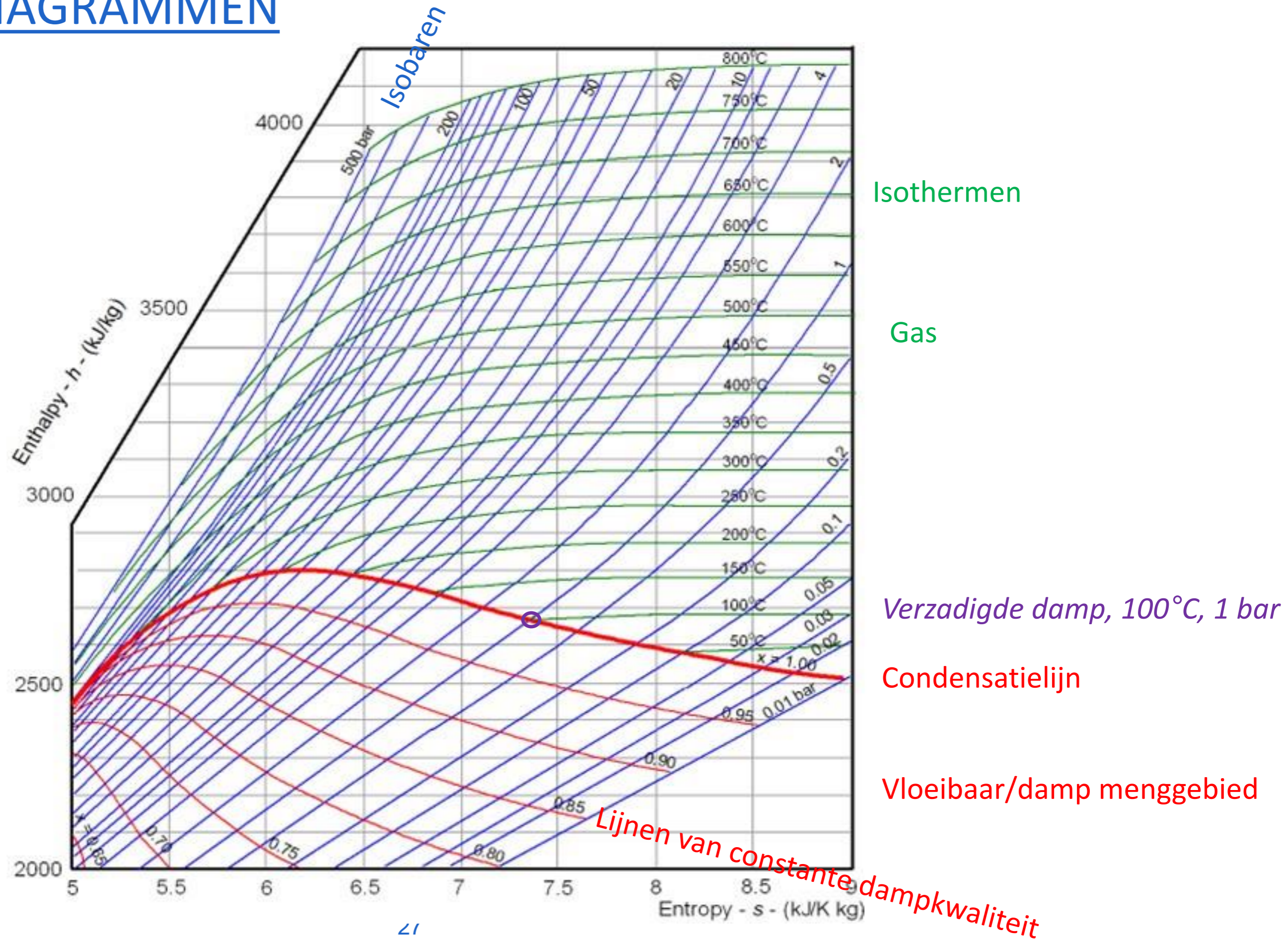
Bij ideaal gas zijn  $U$  en  $H$  enkel afhankelijk van  $T$

$$\left(\frac{\partial S}{\partial p}\right)_T = \frac{-n \cdot R}{p}$$

$$dS = \frac{dQ}{T} = \frac{dW}{T} = \frac{p \cdot dV}{T} = -\frac{n \cdot R \cdot dp}{p}$$

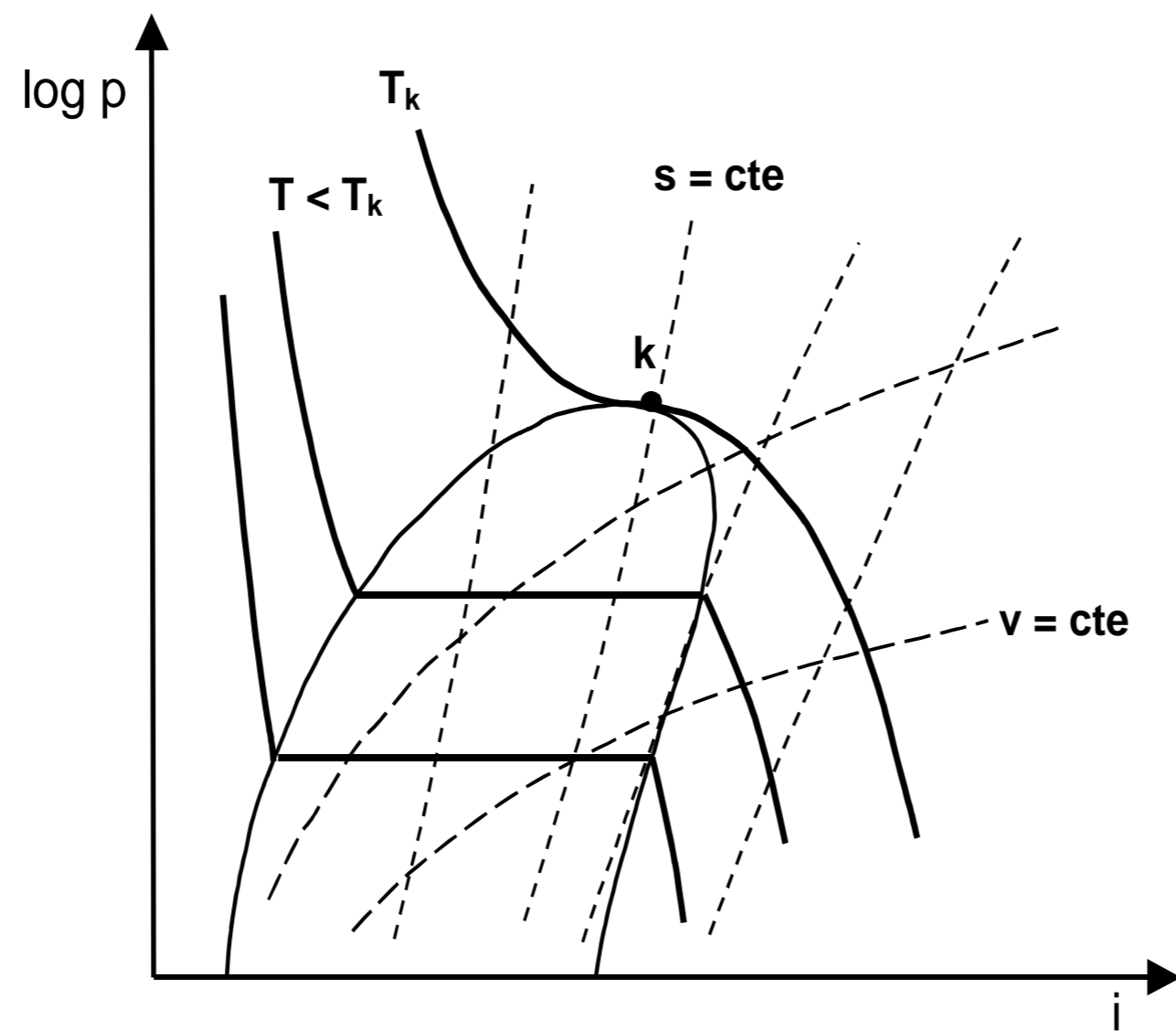
# 3.9. TOESTANDSDIAGRAMMEN

- Het  $h,s$ -diagram van water:



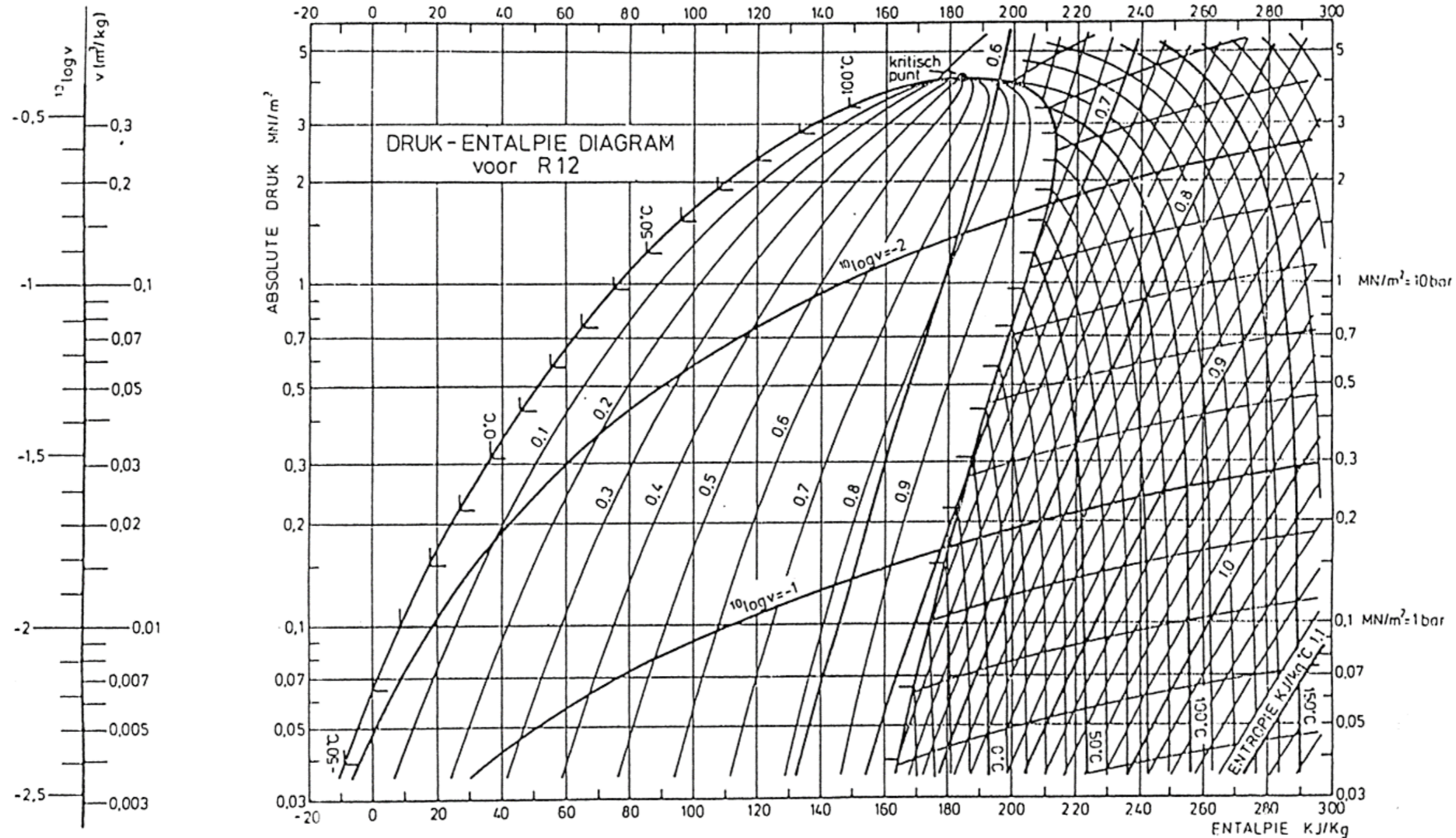
## 3.9. TOESTANDSDIAGRAMMEN

- Het  $\log p, h$ -diagram:
  - Drukt de druk uit (in logaritme) in functie van specifiek enthalpie (bemerkt in grafiek symbool  $i$  ipv  $h$ )
  - Isenthalpen = verticaal, isobaren = horizontaal



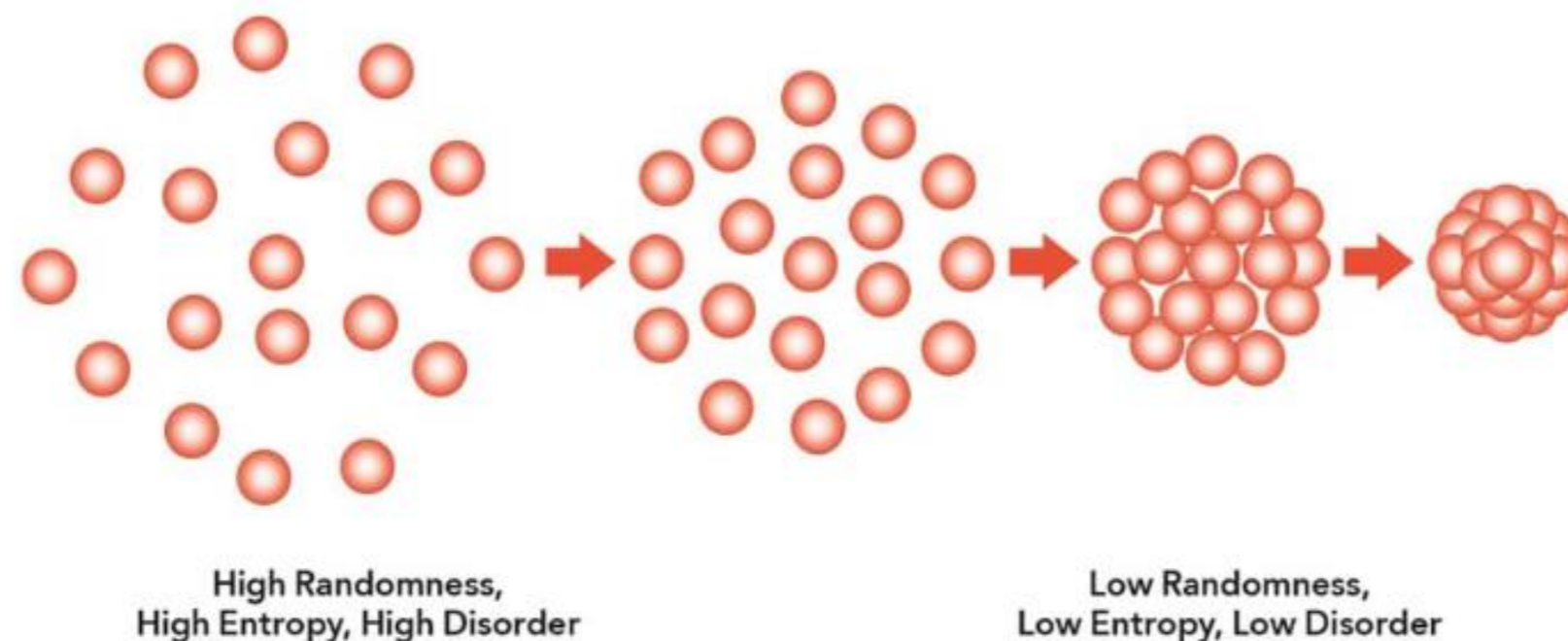
# 3.9. TOESTANDSDIAGRAMMEN

- Het log  $p, h$ -diagram:
  - Voorbeeld reëel gas,



## 3.10. DERDE HOOFDWET

- Entropie = maat voor wanorde in het systeem
- Entropie stijgt bij vast  $\rightarrow$  vloeibaar  $\rightarrow$  gas



- **Derde hoofdwet:** bij een temperatuur van 0 K wordt de entropie constant (bij referentie 0 J/K)

- Bij ieder andere temperatuur: entropie is positief

## 3.10. DERDE HOOFDWET

- Bemerk dat bij 0 K,  $U$  en  $H$  niet gelijk zijn aan nul !
  - (waterstofgas bij 0 K, een vaste stof, heeft nog steeds chemisch energie in zich, bijvoorbeeld)
- Wel wordt de **standaard vormingsenthalpie** gedefinieerd
  - = De enthalpieverandering bij de vorming van een bepaalde stof bij 25°C en 1 atm uitgaande van de samenstellende elementen in stabiele vorm
  - Stabiele vorm = gassen ( $H_2$ ,  $O_2$ ,  $N_2$ ), vaste stoffen (C)
  - Symbool  $\Delta H_f^\circ$

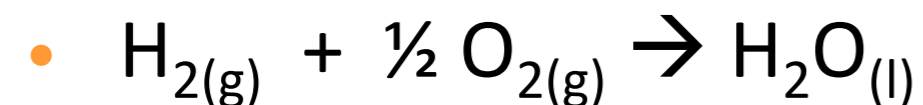


## 3.10. DERDE HOOFDWET

- De standaard vormingsenthalpie, voorbeelden:

- Waterstofgas  $\Delta H_f^\circ = 0 \text{ kJ/mol}$

- Water (vloeibaar),



- $\Delta H_f^\circ = -286 \text{ kJ/mol}$

- Water (gasvormig)

- $\Delta H_f^\circ = -242 \text{ kJ/mol}$

- Het verschil is de latente warmte (verdampingswarmte) =  $-242 + 286 = 44 \text{ kJ/mol}$  (ofwel  $2,44 \text{ MJ/kg}$ ), ofwel

>0, endotherm !



# THERMODYNAMISCHE PROCESSEN – AJ '19-'20

## H7: TOEGEPASTE THERMODYNAMISCHE PROCESSEN MET

### FASEOVERGANG – DEEL 1

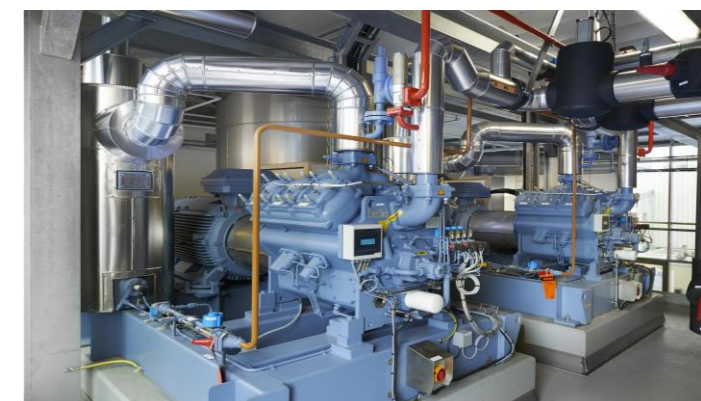
Prof. dr. ir. Frederik Ronsse

## 7.1. INLEIDING

- Alle cycli in H4 werken uitsluitend met uitwisseling van voelbare warmte
- Specifieke latente warmte (vloeibaar  $\leftrightarrow$  gas) kan vrij groot zijn in vgl. met voelbare warmte (bijv. water)
- Men kan zeer performante cycli ontwikkelen op basis van latente warmte-uitwisseling in combinatie met voelbare warmte
- Vbn.



**Rankinecyclus** (op basis van water/stoom)  
Klassieke thermische centrales  
Kerncentrales

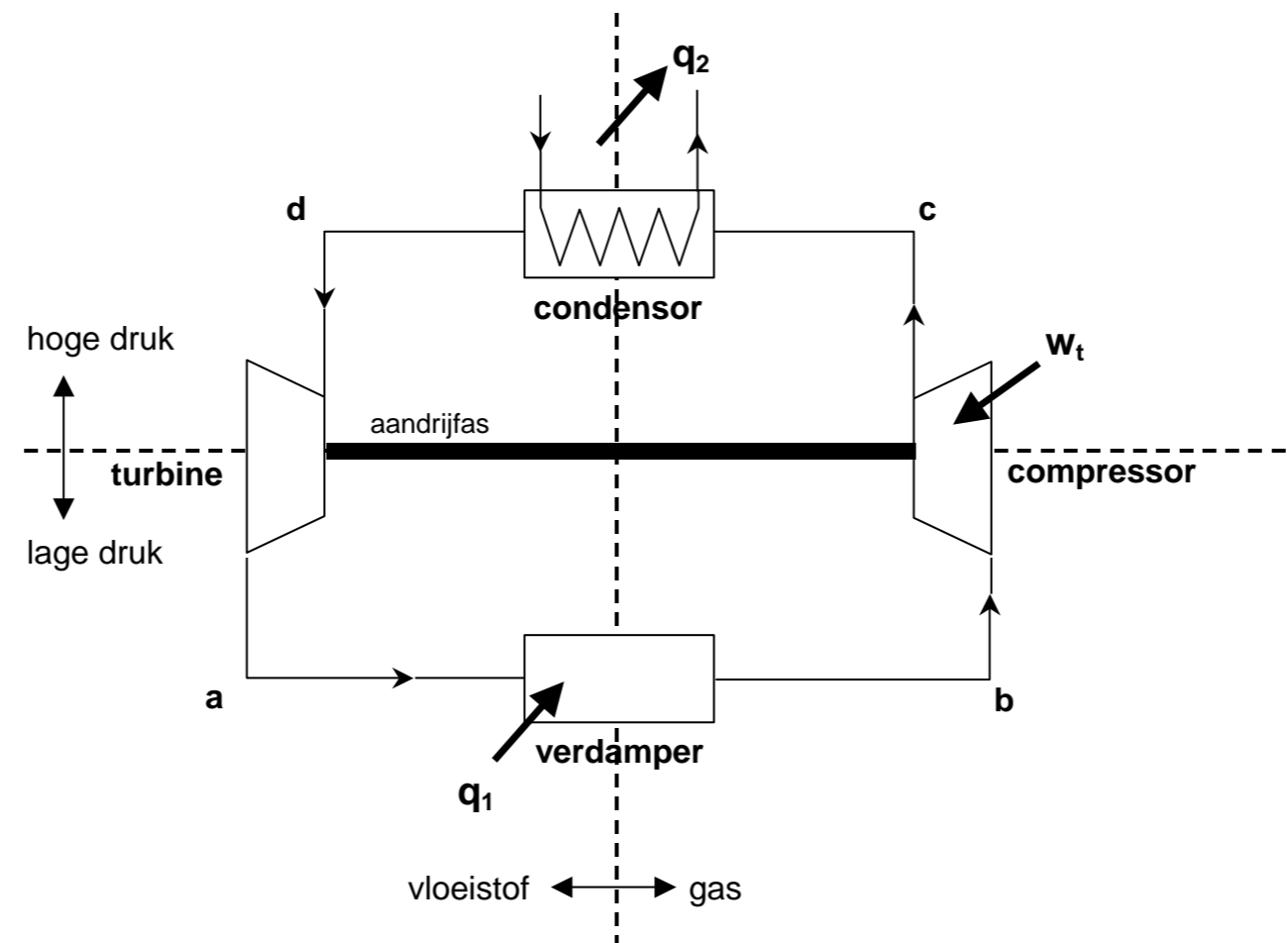


**Koelcyclus of dampcompressiecyclus** (op basis van organische verbinding)  
Koelmachines  
Air conditioning  
Warmtepompen



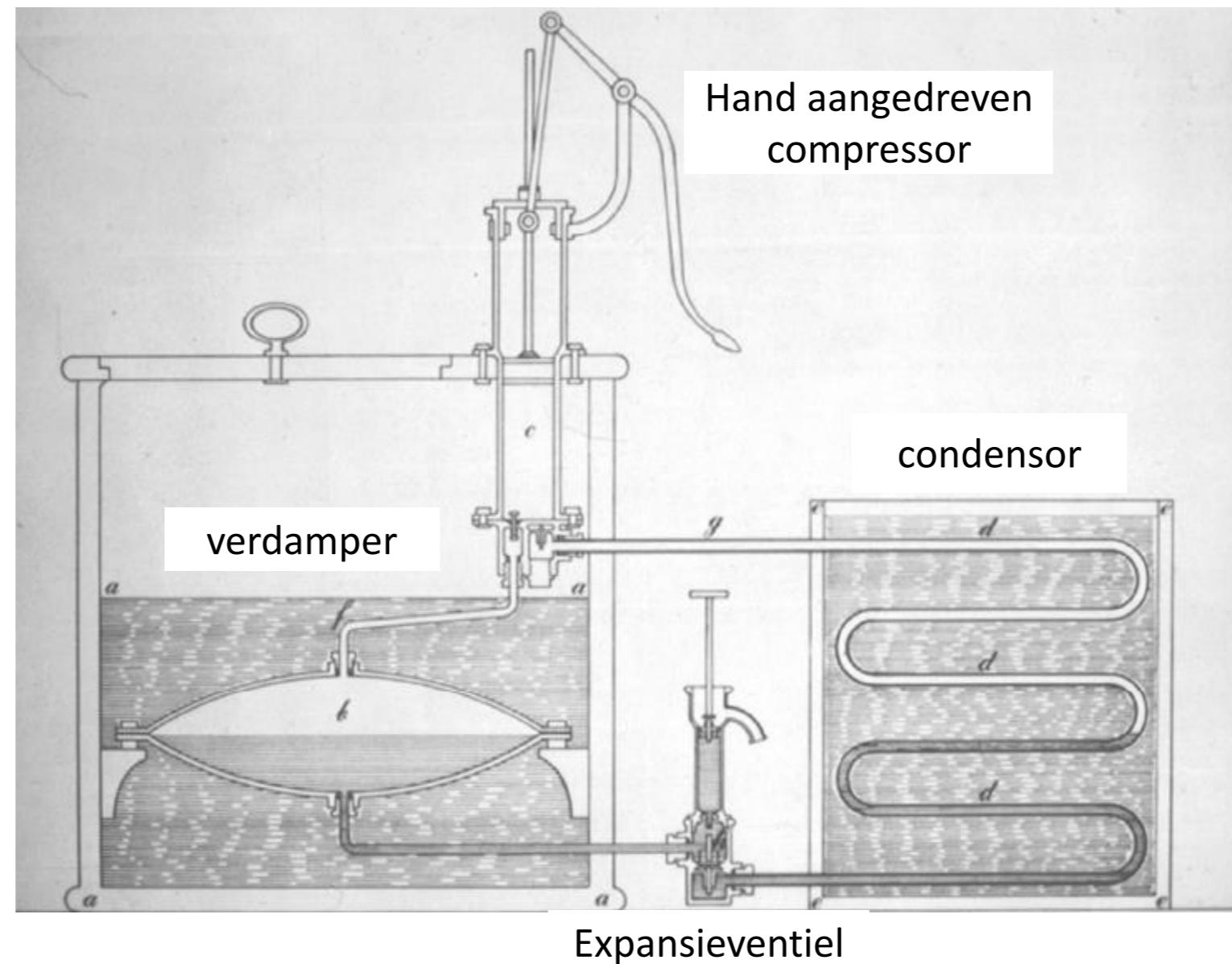
## 7.2. DE KOELINSTALLATIE

- Onderdelen
  - *verdamer*: onttrekken van (latente) warmte uit de koelkamer, koelmiddel van vloeistof- naar de dampfase
  - *compressor*: dampvormig koelmiddel wordt samengedrukt tot oververhitte damp
  - *condensor*: oververhit dampvormig koelmiddel condenseert, met afgifte latente condensatiewarmte
  - *expansieturbine* of *expansieventiel*: drukverlaging in vloeibaar koelmiddel (onderkoeld koelmiddel)



## 7.2. DE KOELINSTALLATIE

- Onderdelen
  - In den beginne... (Perkins 1834 patent)

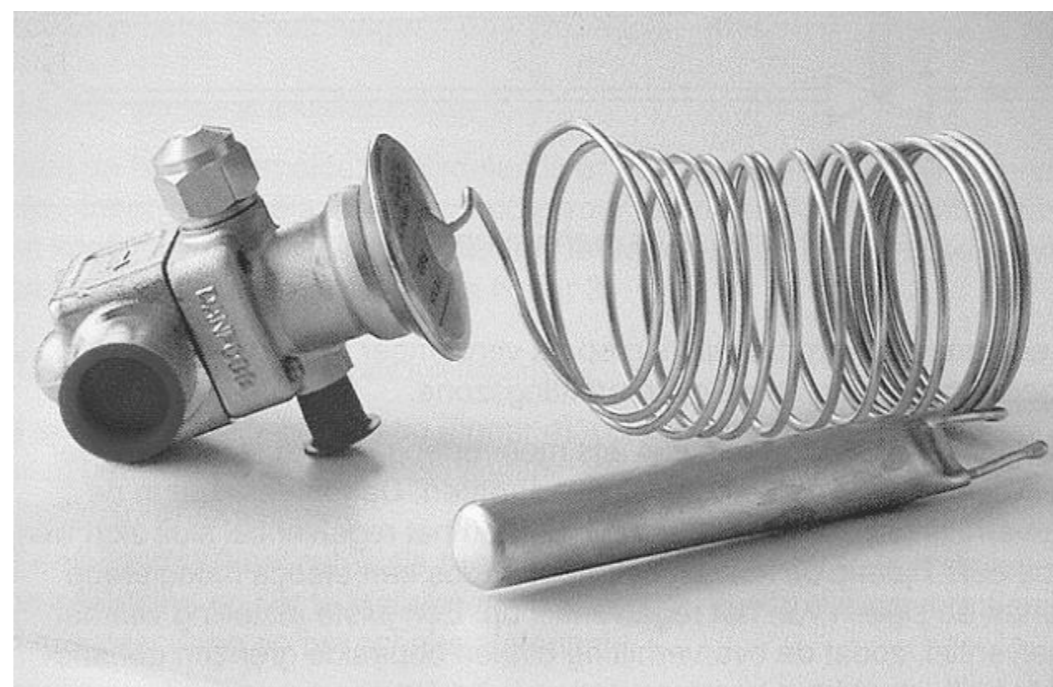


## 7.2. DE KOELINSTALLATIE

- Onderdelen
  - Verdampfer



- Expansieventiel + voeler



- Compressor en condenser geïntegreerd in één unit.

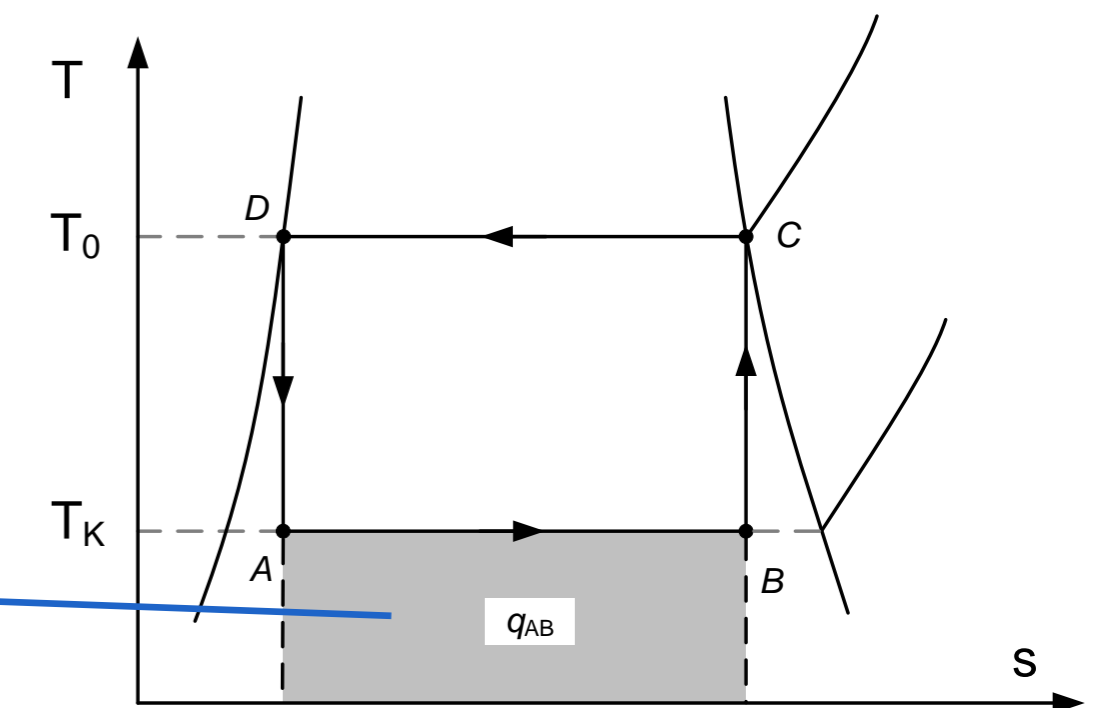
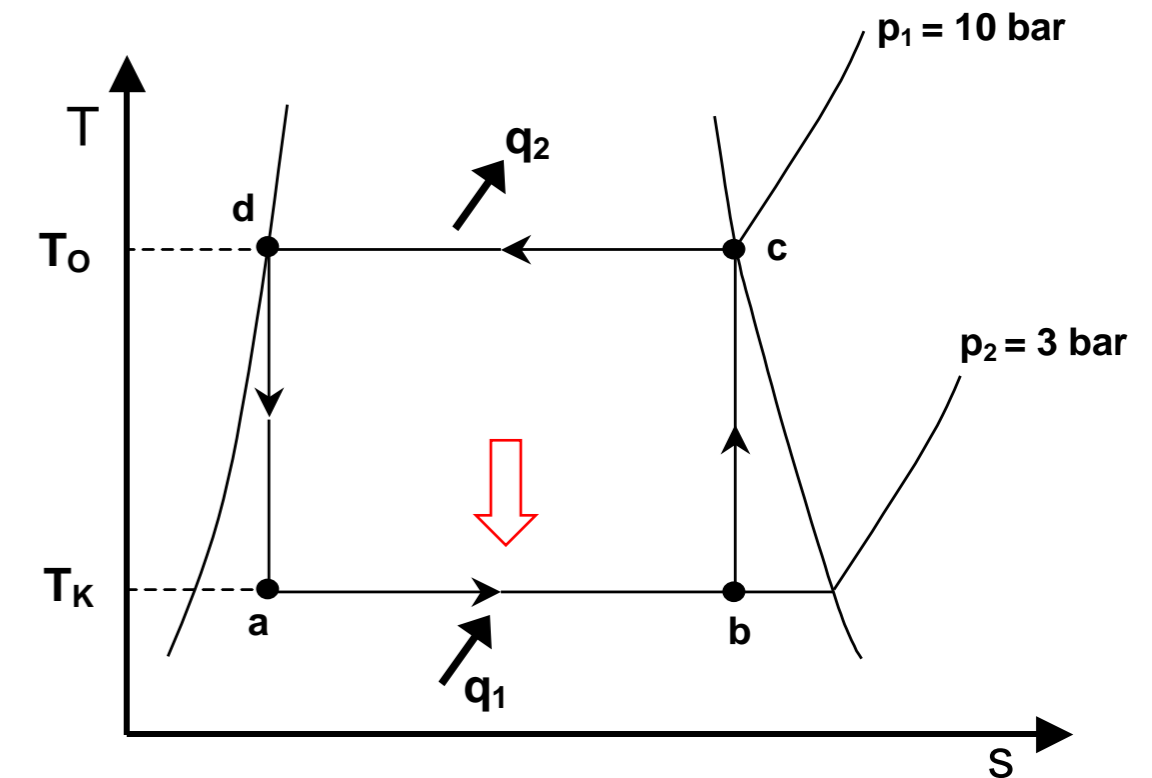
## 7.3. DE OMGEKEERDE CARNOT KRINGLOOP

- Koelmachine = omgekeerde Carnotkringloop met een koelmiddel (NH<sub>3</sub>, R12, R22, ...) als werkfluidum
- 1<sup>ste</sup> stap: de verdamper (traject *ab*)
  - Onttrekt warmte aan de koelkamer ( $q_1 = q_{ab}$ ). De koelkamer staat op  $T_k$
  - Omkeerbaar, isobaar en isotherm proces
  - Hoeveelheid verdampt:  $(x_b - x_a)$  kg per kg koelmiddel
  - Geen uitwisseling van arbeid ( $w_{ab} = 0$ )
  - De opgenomen warmte → enthalpietoename van het koelmiddel,

$$q_{ab} = i_b - i_a$$

- Opgenomen warmte = oppervlak onder 'ab' in het  $T,s$ -diagram,

$$q_{ab} = T_K \cdot (s_b - s_a)$$

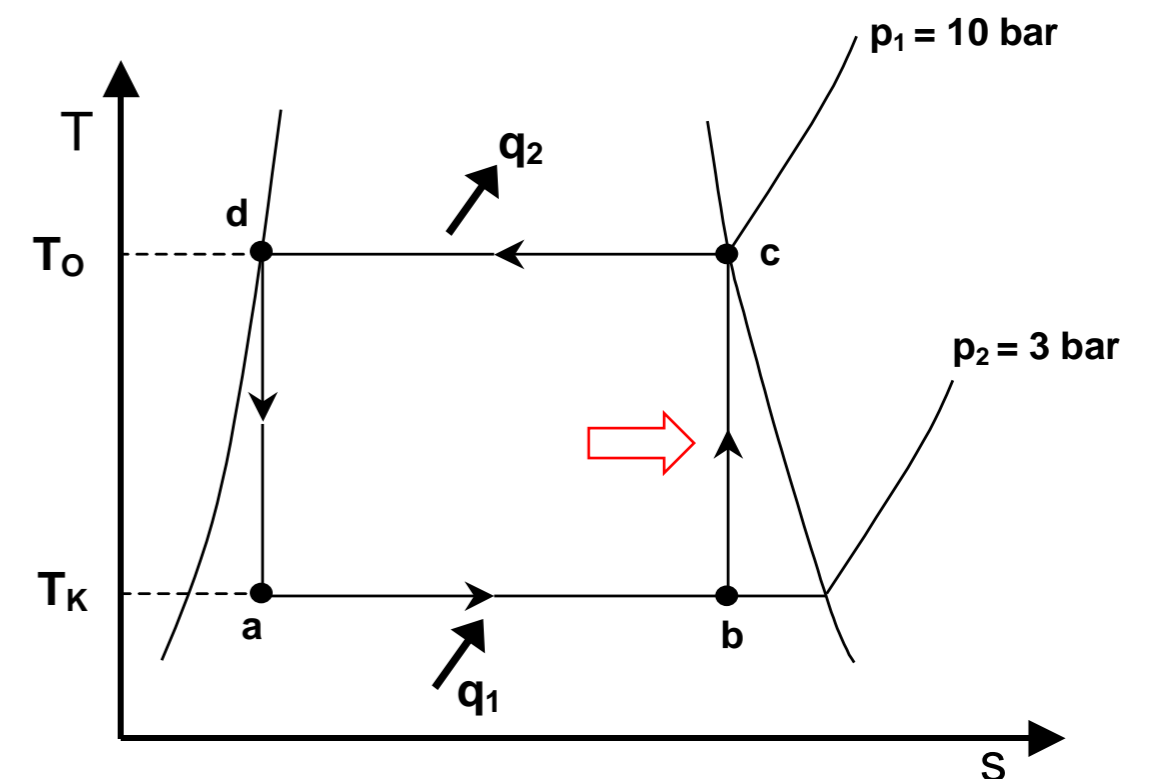


## 7.3. DE OMGEKEERDE CARNOT KRINGLOOP

- 2<sup>de</sup> stap: de compressor (traject *bc*)
  - Bemerk in 'b': niet alle koelmiddel is verdampt (b niet op de kooklijn)
  - De compressor drukt het gasrijke mengsel samen (zonder wrijving, reversibel)
  - Isentropisch en adiabatisch proces: sterke temperatuurstijging
  - Geen warmteuitwisseling, wel levering van arbeid op het systeem (*compressie-arbeid*) met enthalpie-toename tot gevolg (bemerkt teken):

$$0 = w_{t,bc} + i_c - i_b \quad \text{of} \quad w_{t,bc} = i_b - i_c$$

- De arbeid: negatief teken (omgeving → systeem)





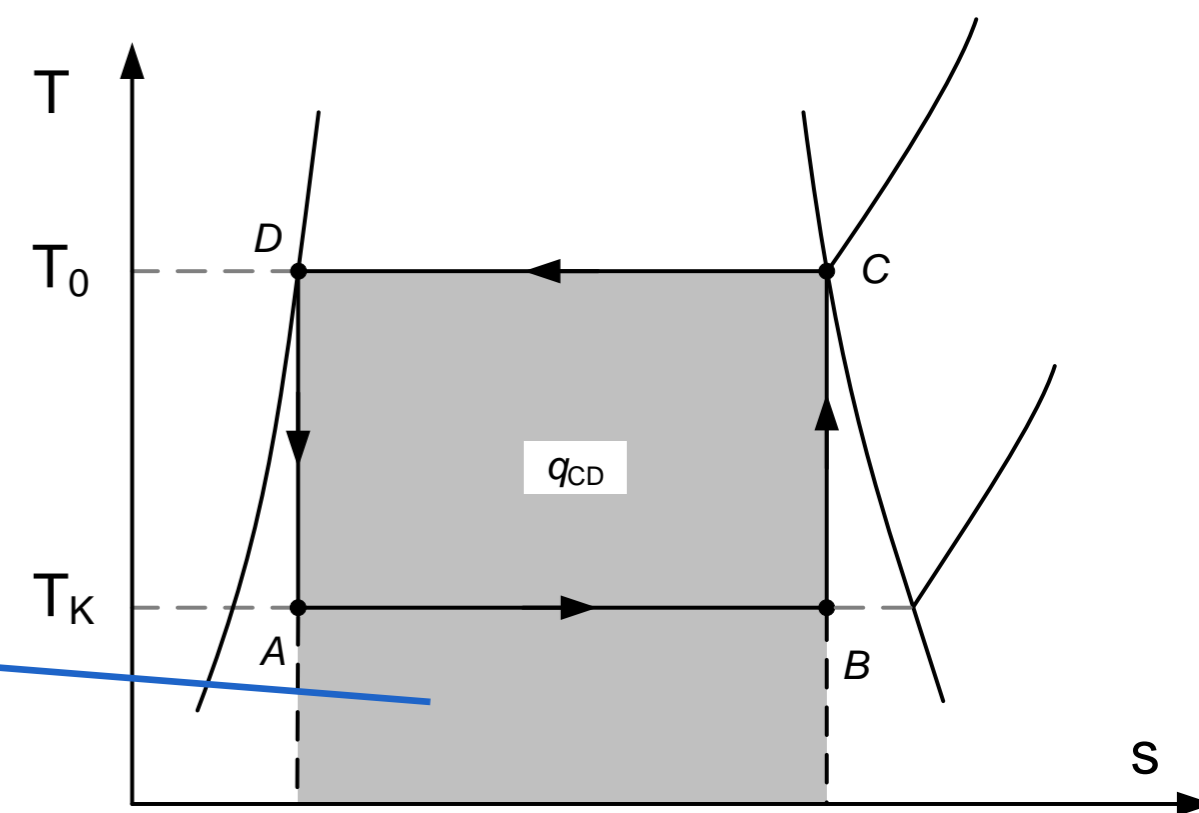
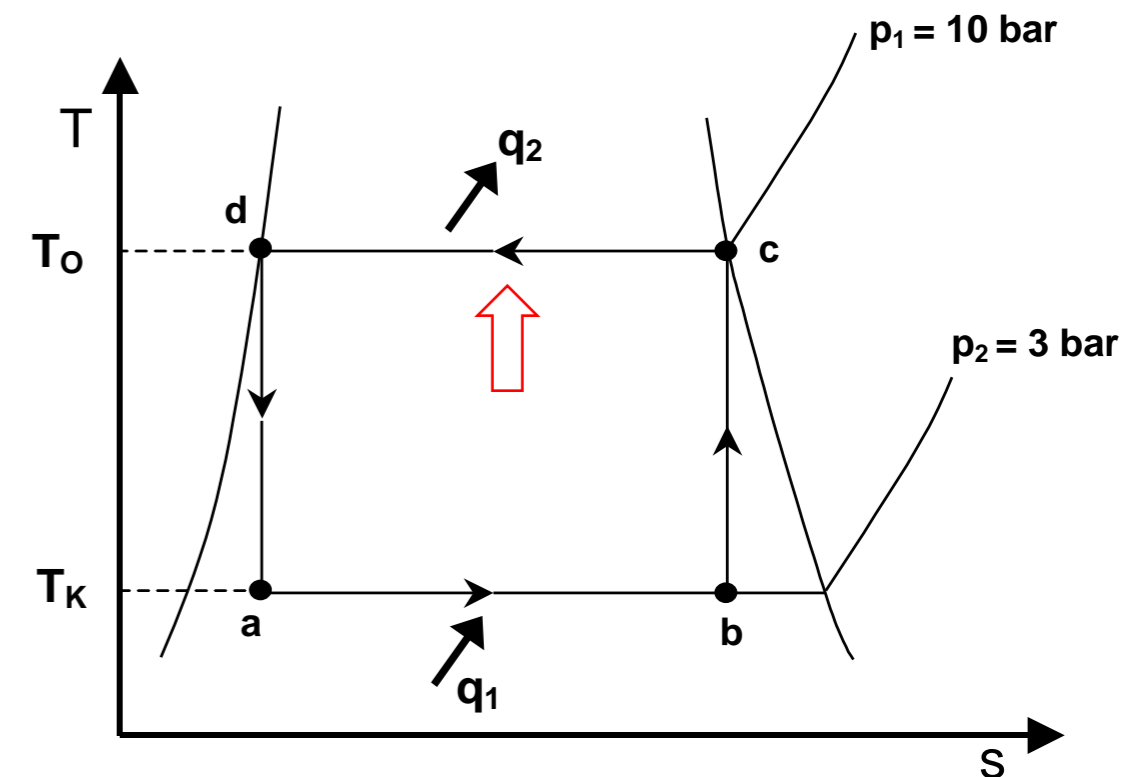
## 7.3. DE OMGEKEERDE CARNOT KRINGLOOP

- 3<sup>de</sup> stap: de condensor (traject  $cd$ )
  - Staat de condensatiewarmte ( $q_2=q_{cd}$ ) af aan de buitenomgeving (staat op  $T_0$ )
  - Omkeerbaar, isotherm en isobaar proces
  - Geen uitwisseling van arbeid ( $w_{cd} = 0$ )
  - Hoeveelheid gecondenseerd koelmiddel:  $(x_c - x_d)$  kg per kg koelmiddel
  - De enthalpie-afname van het koelmiddel  $\rightarrow$  vrijgestelde condensatiewarmte, of (is negatief, afgifte):

$$q_{cd} = i_d - i_c$$

- Afgestane warmte = oppervlak onder 'cd' in het  $T,s$ -diagram,

$$q_{cd} = T_0 \cdot (s_d - s_c)$$

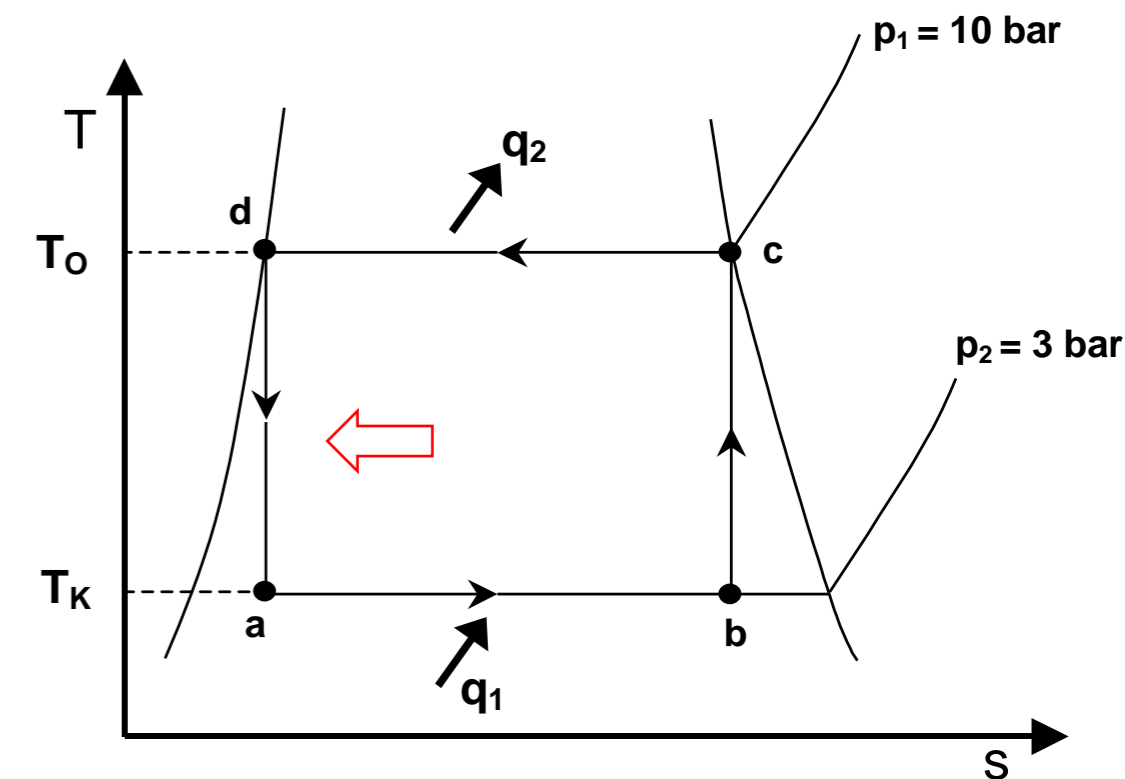


## 7.3. DE OMGEKEERDE CARNOT KRINGLOOP

- 4<sup>de</sup> stap: de expansieturbine (traject *da*)
  - De turbine expandeert het vloeistofvormige koelmiddel tot lagere druk
  - Isentropisch en adiabatisch proces: sterke temperatuursdaling (geen wrijving verondersteld, reversibel)
  - Geen warmteuitwisseling, wel levering van arbeid naar de omgeving (*expansie-arbeid*) met enthalpie-afname van het koelmiddel tot gevolg:

$$0 = w_{t,da} + i_a - i_d \quad \text{of} \quad w_{t,da} = i_d - i_a$$

- De arbeid: positief teken (systeem → omgeving)



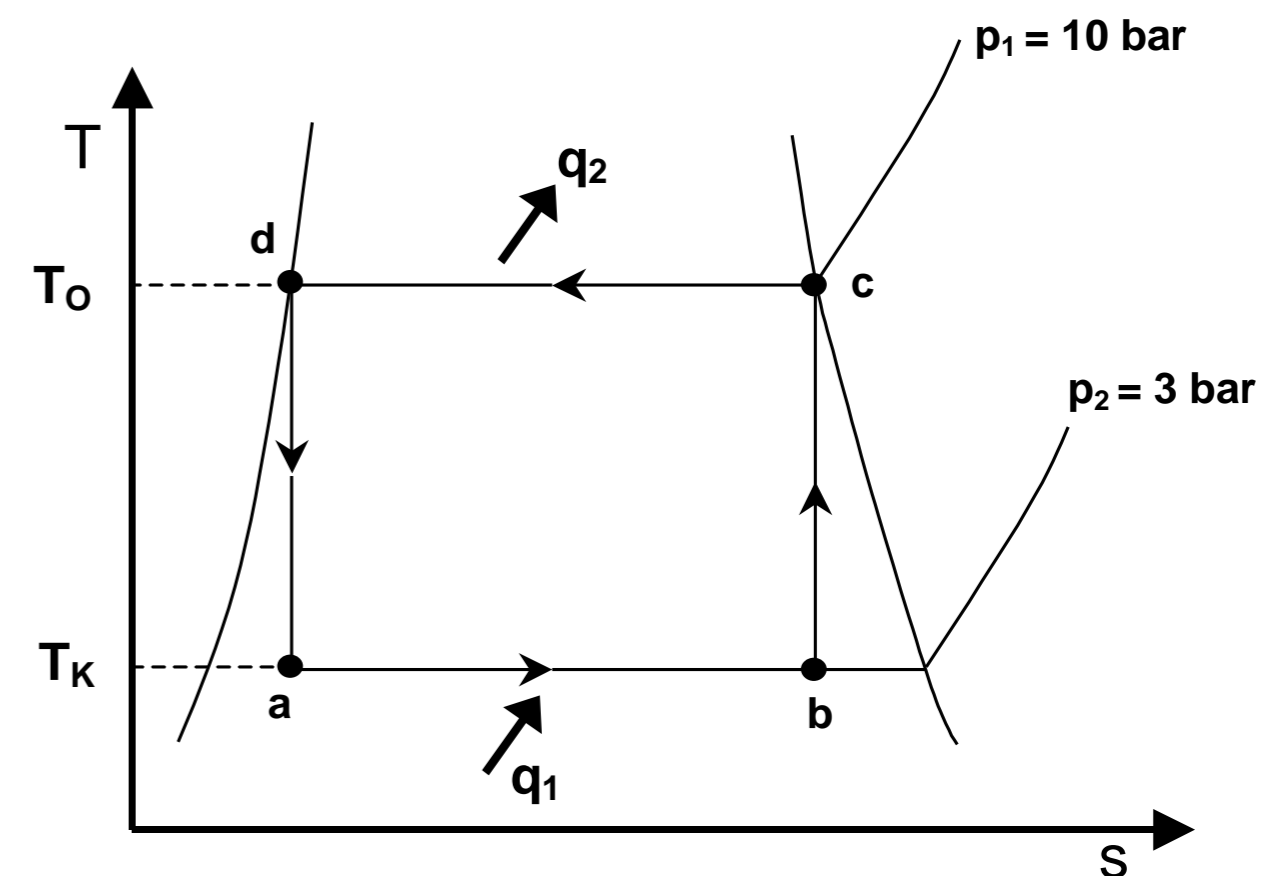
## 7.3. DE OMGEKEERDE CARNOT KRINGLOOP

- Gehele cyclus:

- Globale energiebalans,

$$q_{ad} + q_{cd} = i_b - i_a + i_d - i_c = w_{t,da} + w_{t,da} = w_t$$

- Bemerk:  $q_{ab} < -q_{cd}$  zodat de *technische arbeid*,  $w_t < 0$  (netto arbeid van omgeving naar systeem) ofwel  $w_{t,bc} > -w_{t,da}$  (meer netto arbeid opgenomen door compressor dan die netto geleverd door turbine), cfr. **2<sup>de</sup> hoofdwet**.



## 7.4. EFFICIENTIE VAN DE OMGEKEERDE CARNOT KRINGLOOP

- Efficiëntie van een omgekeerde Carnotcyclus:

- Bij een gewone cyclus: **efficiëntie** = arbeid geleverd ( $w_t$ ) tov. warmte opgenomen ( $q_1$ )
- Bij een omgekeerde cyclus: efficiëntie (ook wel *koudefactor* genoemd) = warmte onttrokken aan de koelkamer (of te koelen reservoir) tov. de netto opgenomen arbeid ( $w_t$ ),

$$\varepsilon_c = \frac{\text{onttrokken warmte}}{\text{netto toegevoegde warmte}} = \frac{q_1}{w_t} = \frac{q_1}{q_2 - q_1} = \frac{i_b - i_a}{|i_d - i_c| - |i_b - i_a|}$$

- Ofwel, rekening houdende met  $q_1/T_K = -q_2/T_O$  (cfr. Carnotcyclus):

$$\varepsilon_c = (COP)_c = \frac{T_K}{T_O - T_K} \leftarrow \text{Altijd in K rekenen !}$$

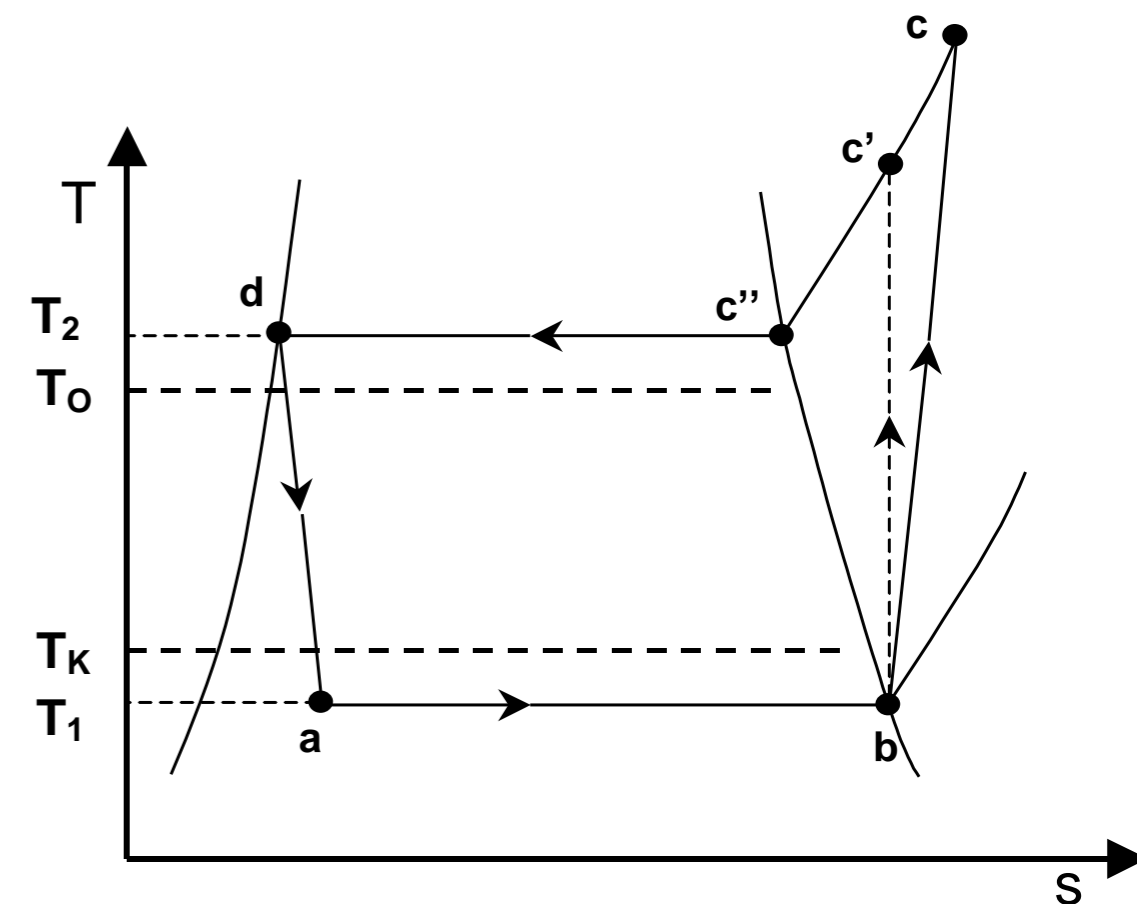
- Andere benaming voor efficiëntie: *coefficient of performance* (COP) of *winstfactor*
- De  $COP_c$  van de omgekeerde Carnotcyclus is de theoretisch hoogst haalbare efficiëntie !

## 7.5. DE WERKELIJKE KOELKRINGLOOP

- De werkelijke koelkringloop wijkt af van de ideale, omdat:
  - 1.  $x_b$  niet gelijk aan 1 (ideaal geval): geeft vloeistofslag  $\rightarrow$  het koelmiddel volledig laten verdampen ( $x_b = 1$ ): punt  $b$  verschuift naar de condensatielijn !
  - 2. Compressie kan nooit volledig reversibel geschieden (punt  $c$ ): wrijvingsverliezen! Gevolg: temperatuur na compressie neemt toe (punt  $c'$ )
  - *Isentropisch rendement* compressor:

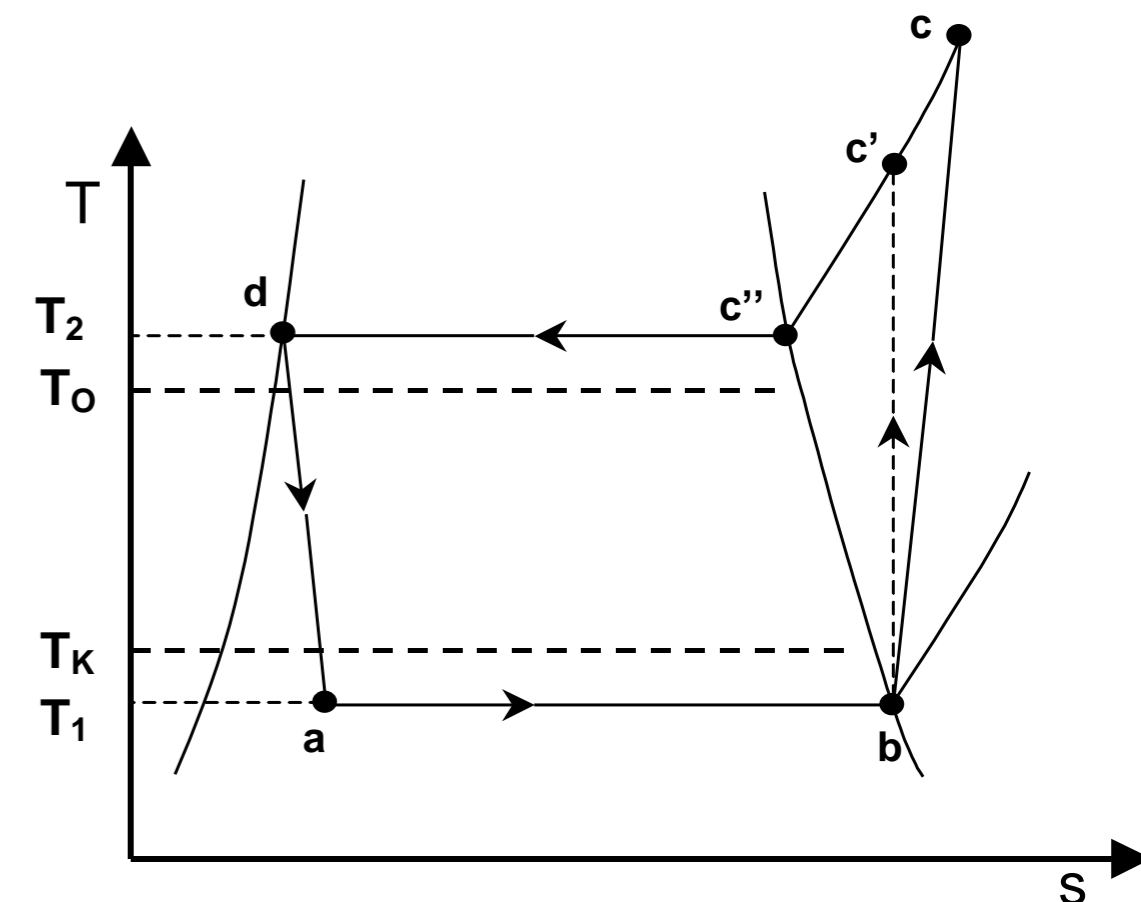
$$\eta_{compressie} = \frac{i_{c'} - i_b}{i_c - i_b}$$

- In de condensor: eerst voelbare warmte onttrekken ( $c c''$ ), dan pas latente warmte ( $c'' d$ )



## 7.5. DE WERKELIJKE KOELKRINGLOOP

- De werkelijke koelkringloop wijkt af van de ideale, omdat:
  - 3. Expansie-arbeid wordt niet benut: te kostelijk.
    - Een expansieventiel of *smoorklep* in de praktijk
    - Smoren is echter niet-omkeerbaar (wrijving treedt op).  
Het traject *da* is voor te stellen als een isenthalpe
  - 4. De verdamper staat op lagere temperatuur dan  $T_K$ , de condensor op een hogere temperatuur dan  $T_O$ . Anders: slecht warmtetransport
- Gevolg: daling efficiëntie



## 7.5. DE WERKELIJKE KOELKRINGLOOP

- De efficiëntie in de gebruikelijke koelkringloop:

- Definitie van COP:

$$\varepsilon = COP = \frac{\text{onttrokken warmte}}{\text{netto toegevoegde arbeid}} = \frac{q_1}{w_t}$$

- Netto toegevoegde arbeid = arbeid geleverd door compressor, expansie (smoorklep) levert geen arbeid terug, aldus:

$$\varepsilon = COP = \frac{q_1}{w_t} = \frac{i_b - i_a}{|i_b - i_c|}$$

- Deze efficiëntie ligt lager dan de theoretische efficiëntie (van een ideale cyclus). Aldus wordt *rendement* gedefinieerd als:

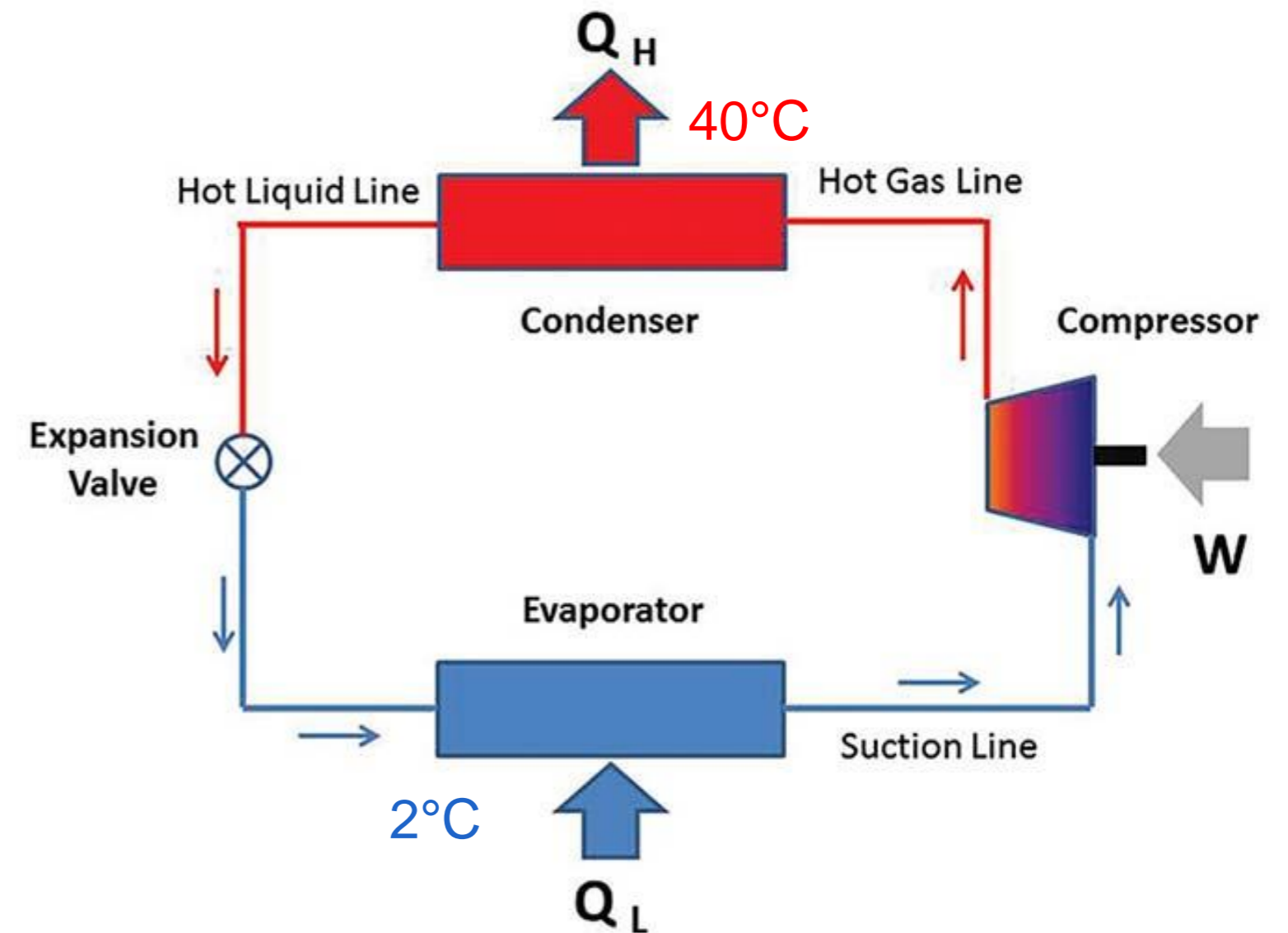
$$\eta = \frac{\text{efficiëntie werkelijke koelkringloop}}{\text{efficiëntie gebruikelijke koelkringloop}} = \frac{COP}{(COP)_c} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_c}$$

- Ideale cyclus heeft dus rendement = 1, in werkelijkheid altijd lager !

## 7.5. DE WERKELIJKE KOELKRINGLOOP

- Rekenvoorbeeld:
  - Een cyclus werkt met koelmiddel R-12
  - Temperatuur verdamper =  $-35^{\circ}\text{C}$
  - Temperatuur condensor =  $25^{\circ}\text{C}$
  - Omgeving op  $15^{\circ}\text{C}$ , koelkamer op  $-30^{\circ}\text{C}$
  - Isentropisch rendement compressor 73 %
  - Bereken
    - De cyclus, met eigenschappen in ieder punt ( $T, h, s, p$ )
    - De behaalde efficiëntie en rendement

Figure 1  
Basic Vapor-Compression Cooling Cycle

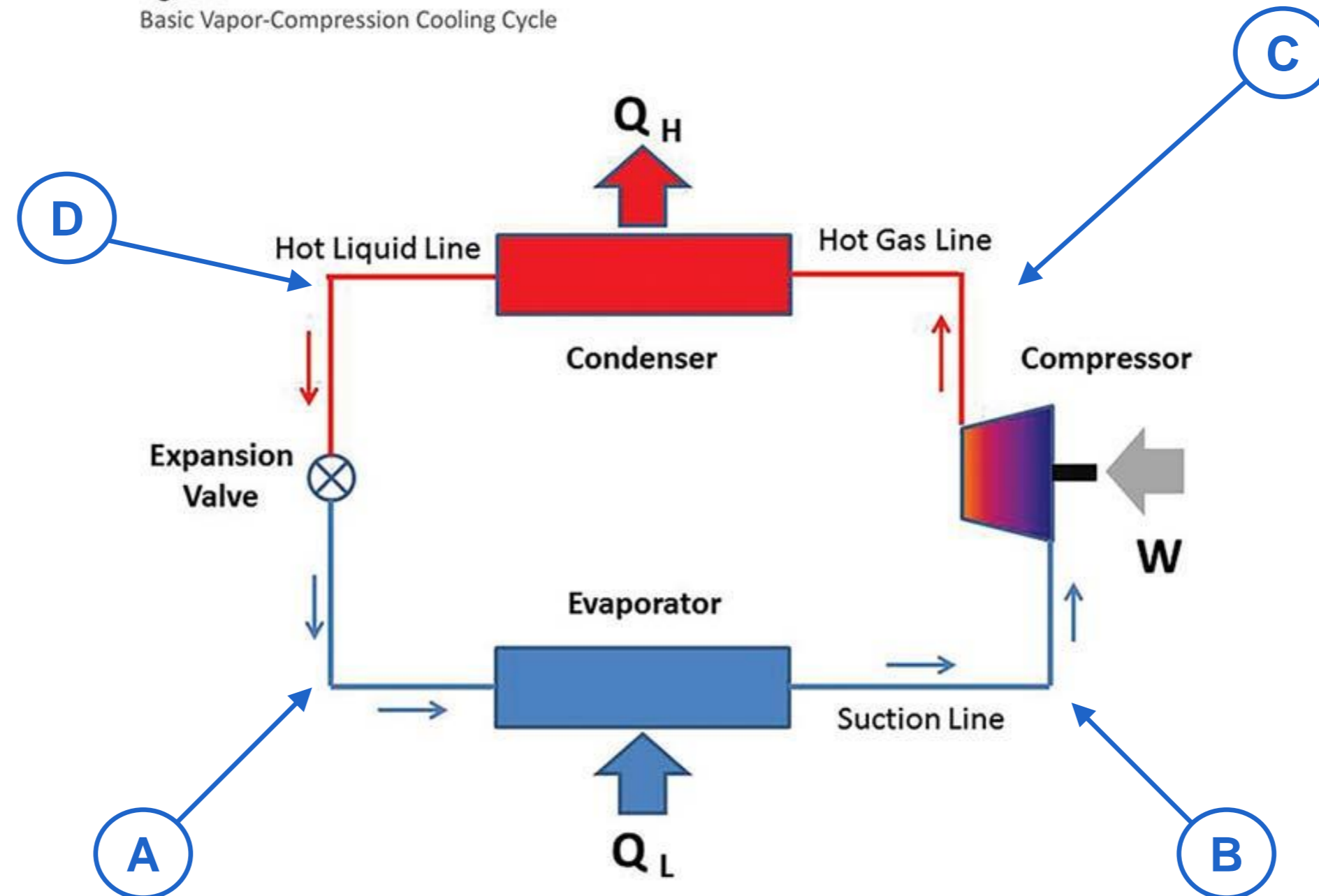




# 7.5. DE WERKELIJKE KOELKRINGLOOP

- Rekenvoorbeeld:

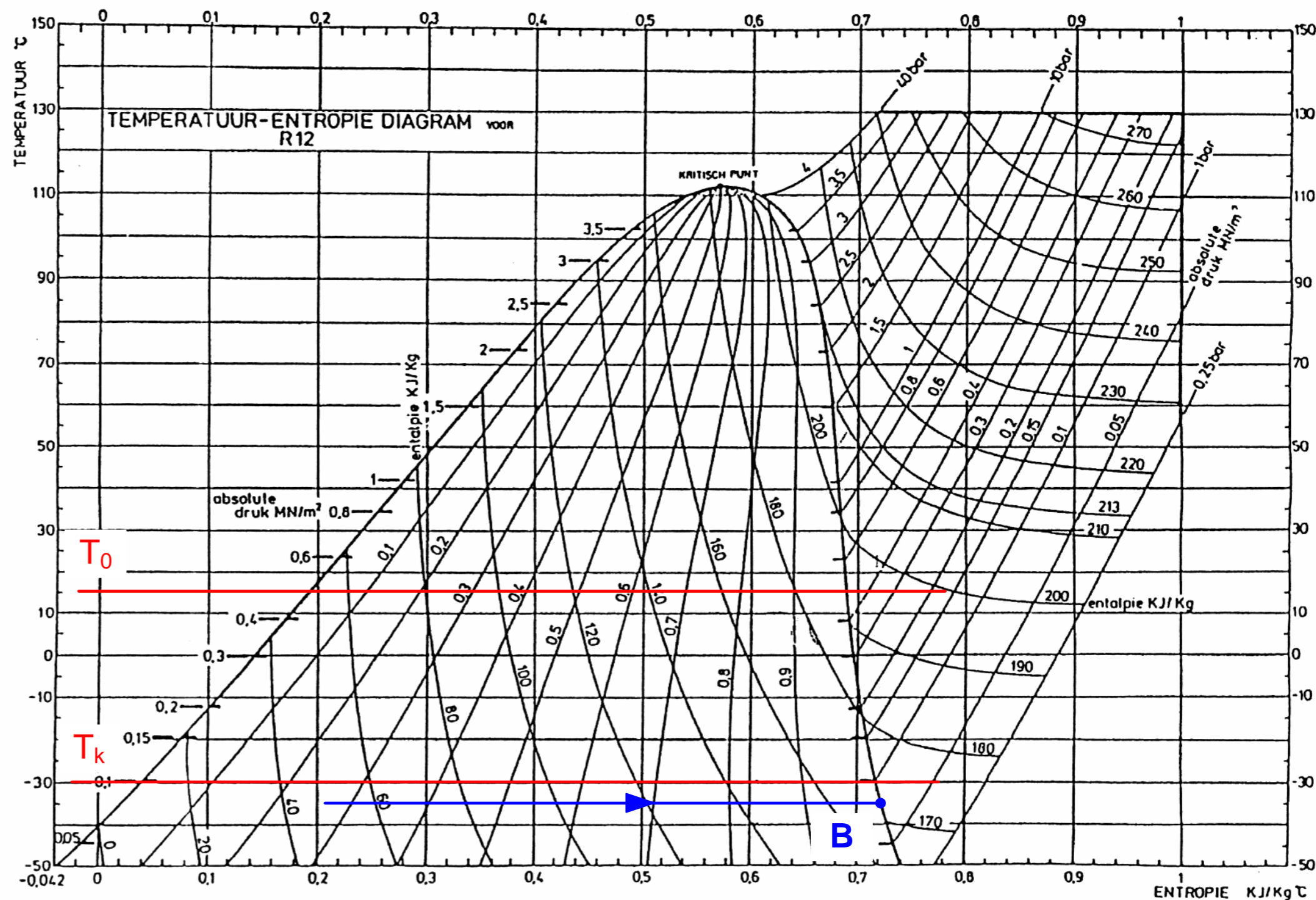
Figure 1  
Basic Vapor-Compression Cooling Cycle



## 7.5. DE WERKELIJKE KOELKRINGLOOP

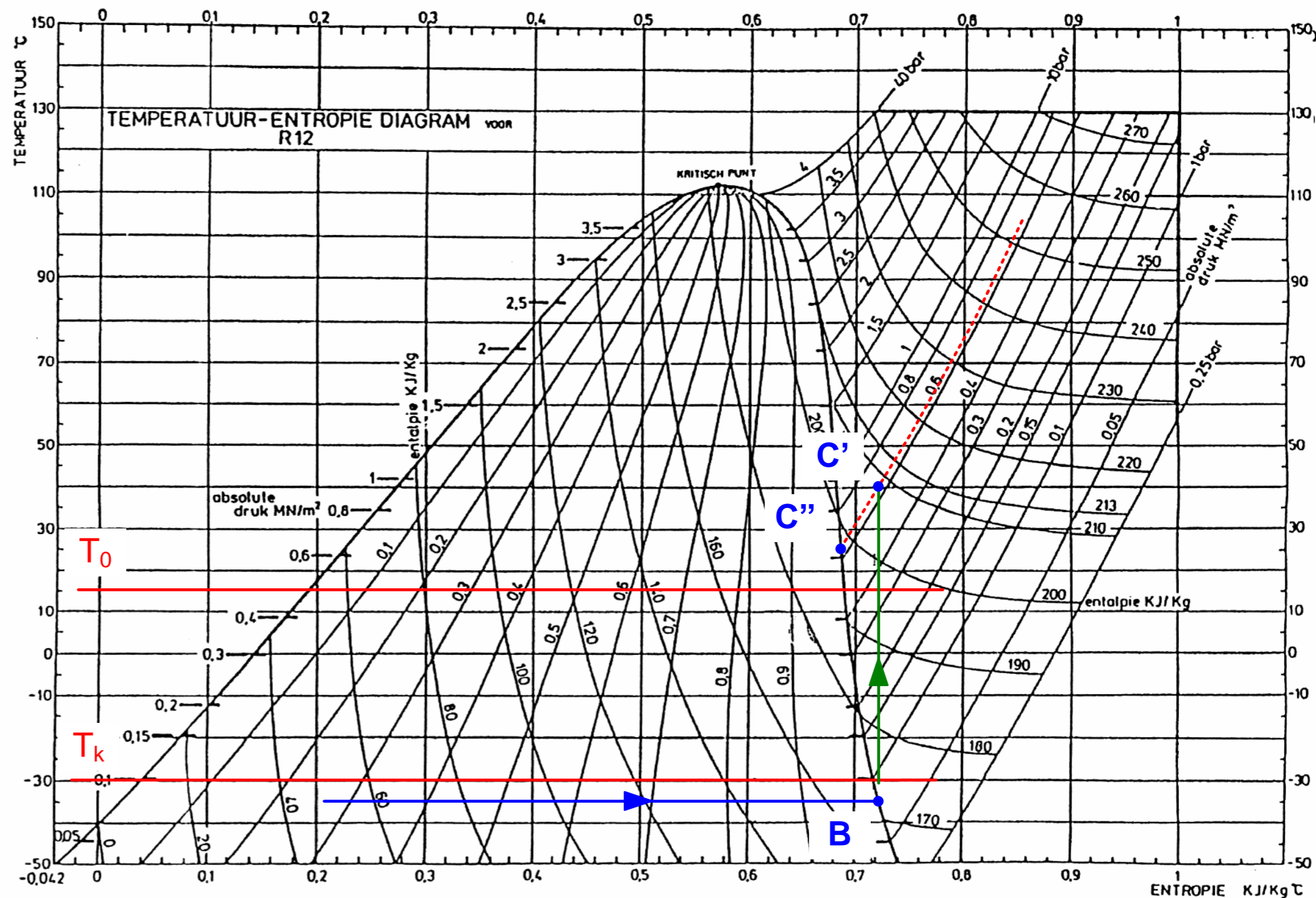
- Rekenvoorbeeld:

- We nemen T,s –diagram van R-12
- We beginnen bij punt **B**
- Gegeven:  $T_B = -35^\circ\text{C}$
- En **B** ligt op de condensatielijn
- We kunnen aflezen dat:
  - via de isenthalpen,  $h_B = 172$  kJ/kg
  - via de Y-as,  $s_B = 0,73$  kJ/kg·K
  - $p_B = 0,7$  bar



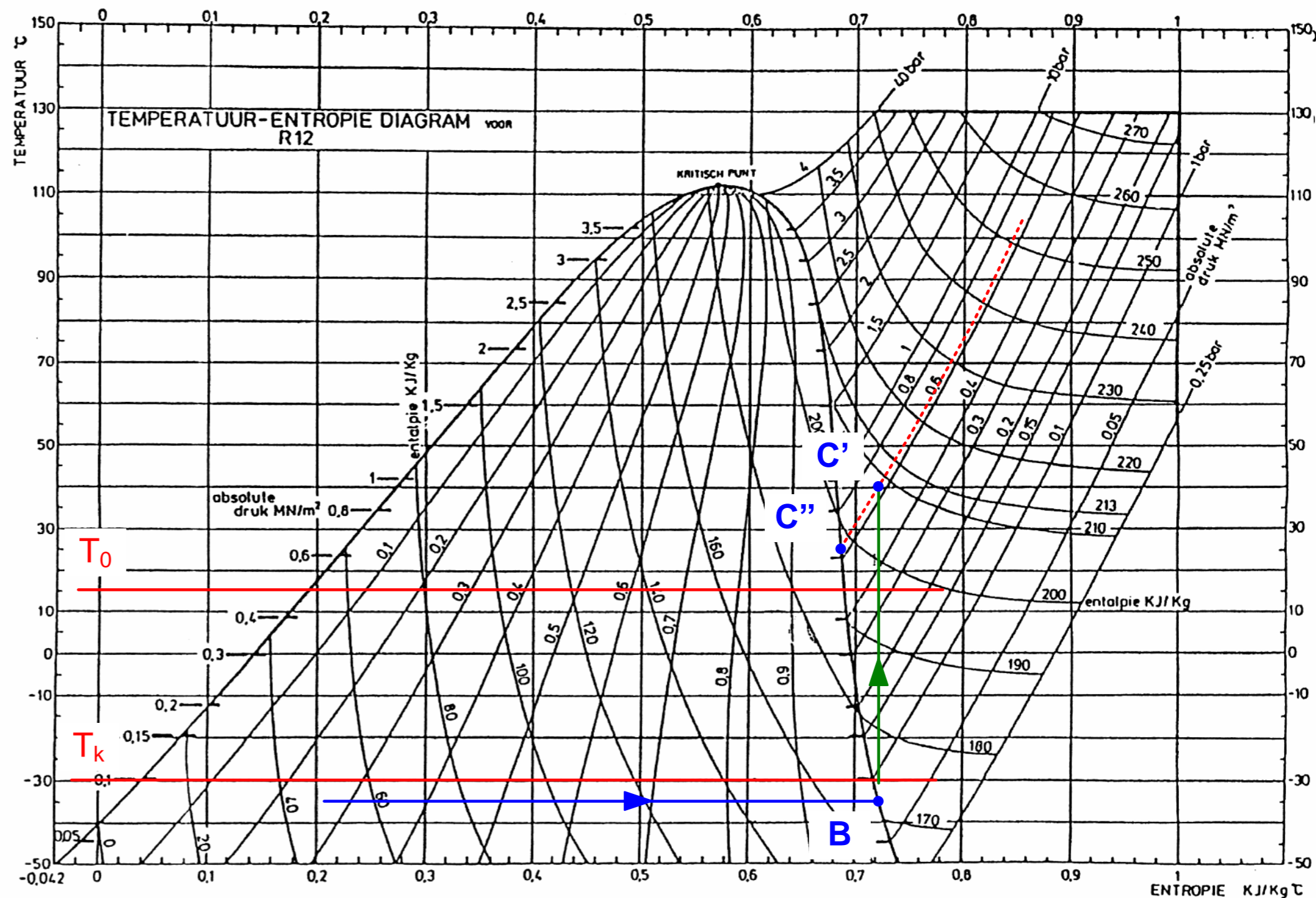
## 7.5. DE WERKELIJKE KOELKRINGLOOP

- Rekenvoorbeeld:
  - We tekenen nu het punt  $C'$  zijnde het punt na ideale (isentropische) compressie
  - We tekenen de isobare, die samenvalt met de isotherme van  $25^\circ\text{C}$  ( $T_{C''}=T_D$ ) in het menggebied
  - Het punt  $C'$  ligt op deze isobare en  $s_{C'} = s_B$
  - De druk van de isobare bedraagt (aflezen),  $p_{C'} = 6,5$  bar



## 7.5. DE WERKELIJKE KOELKRINGLOOP

- Rekenvoorbeeld:
  - We tekenen nu het punt **C'** zijnde het punt na ideale (isentropische) compressie
  - De druk van de isobare bedraagt (aflezen),  $p_{C'} = 6,5$  bar
  - Uiteraard is  $s_{C'} = s_B = 0,73$  kJ/kg·K
  - Enthalpie af te lezen via de isenthalpen,  $h_{C'} = 209$  kJ/kg
  - Het groene traject stelt de ideale compressie voor !



# 7.5. DE WERKELIJKE KOELKRINGLOOP

- Rekenvoorbeeld:
  - We tekenen nu het punt **C** zijnde het punt na niet-ideale (niet-isentropische) compressie
  - $p_C = p_{C'} = 6,5 \text{ bar}$
  - We gebruiken het isentropisch rendement van de compressor (gegeven) om de onbekende enthalpie in het punt C te berekenen

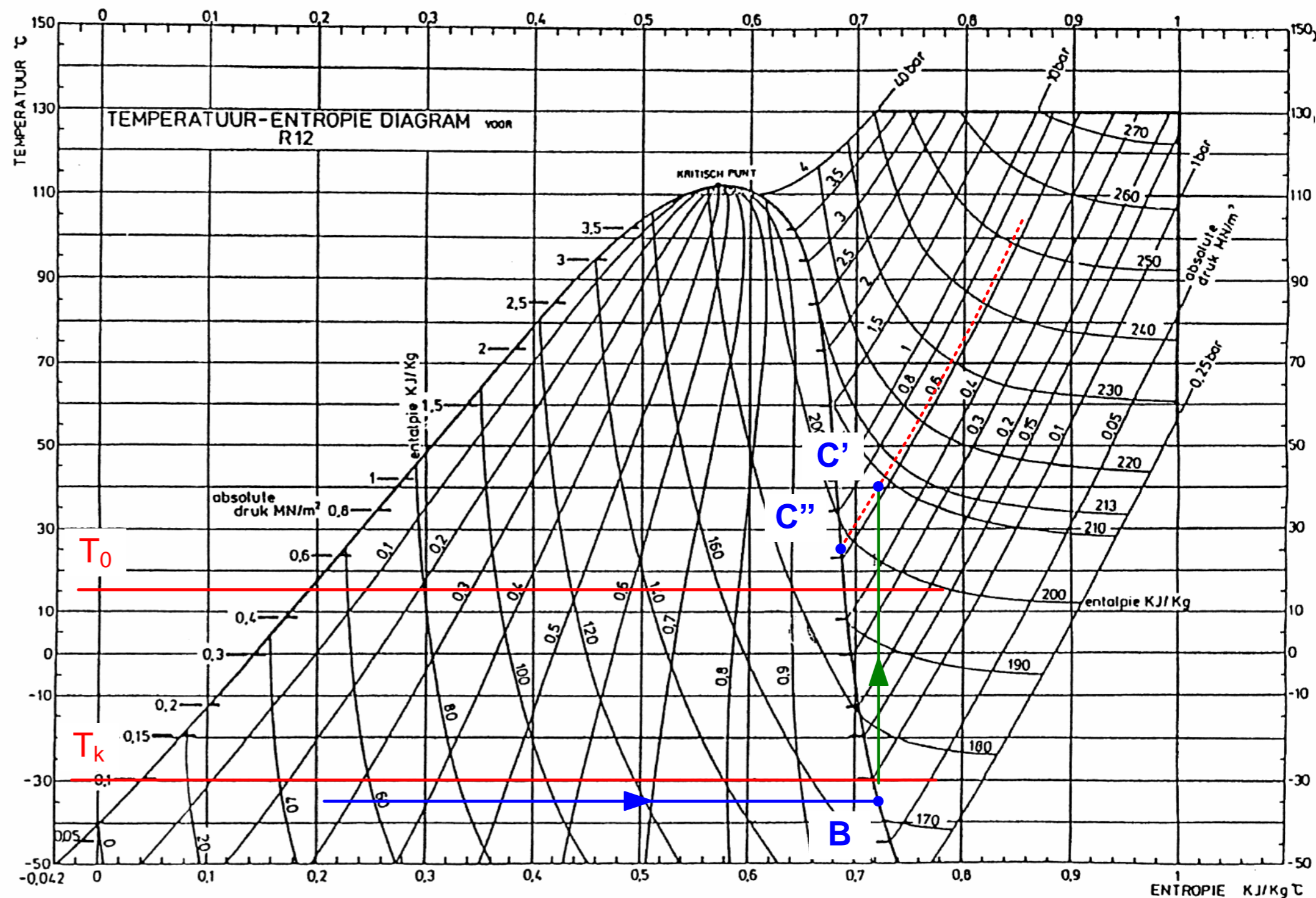
$$\eta_{compressor} = 0.73 = \frac{i_{C'} - i_B}{i_C - i_B}$$

⇓

$$0.73 = \frac{209 - 172}{i_C - 172}$$

⇓

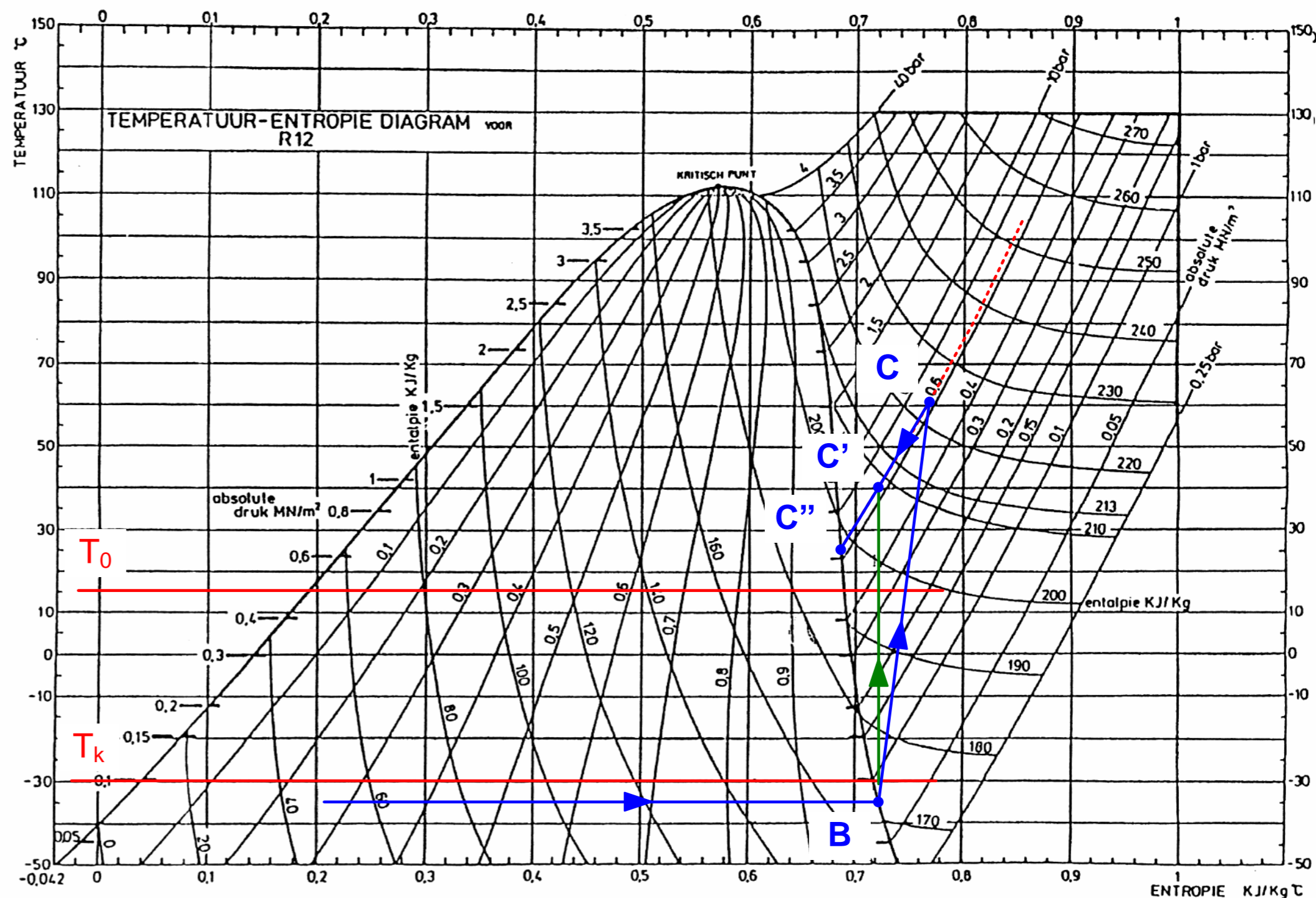
$$i_C = 172 + \frac{209 - 172}{0.73} \text{ kJ/kg} = 223 \text{ kJ/kg}$$



## 7.5. DE WERKELIJKE KOELKRINGLOOP

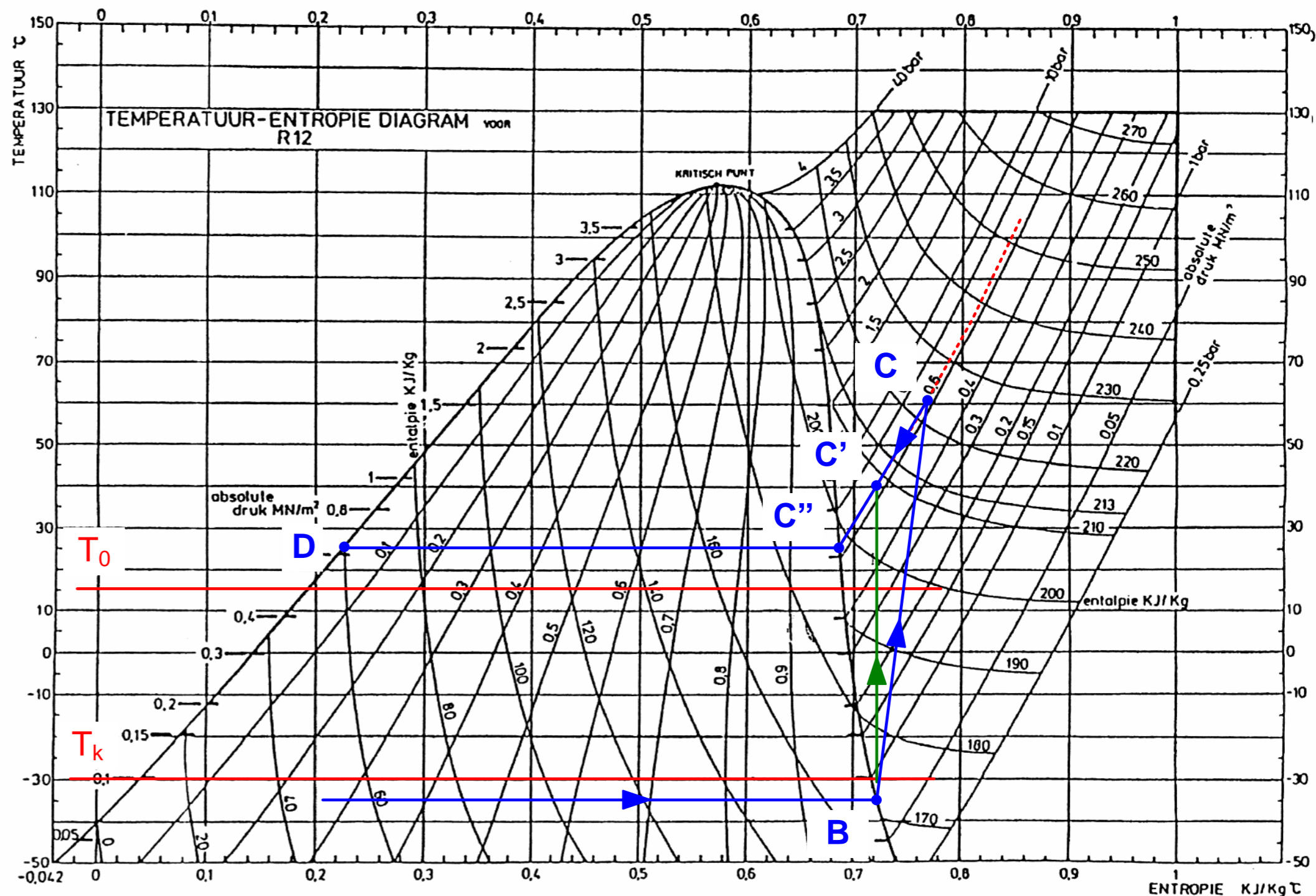
- Rekenvoorbeeld:

- We tekenen nu het punt **C** zijnde het punt na niet-ideale (niet-isentropische) compressie
- $p_C = p_{C'} = 6,5 \text{ bar}$
- $h_C = 223 \text{ kJ/kg}$
- $s_C = 0,76 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$  (aflezen op de X-as)
- $T_C = 60^\circ\text{C}$  (aflezen op de Y-as)
- Het werkelijk te doorlopen traject is aldus  $B \rightarrow C$  (compressie) en  $C \rightarrow C''$  (afgifte van de voelbare warmte na afkoelen oververhitte damp)



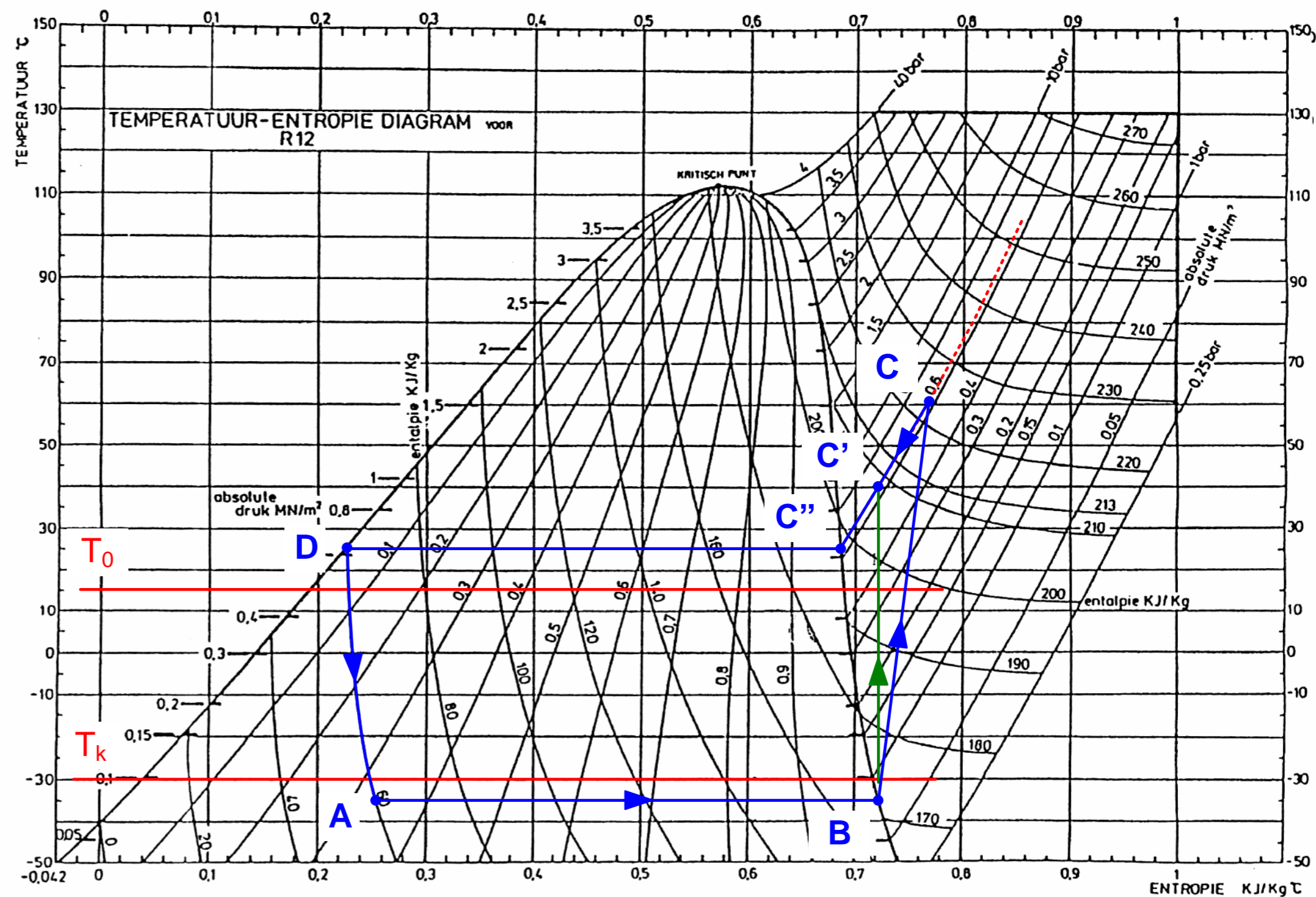
## 7.5. DE WERKELIJKE KOELKRINGLOOP

- Rekenvoorbeeld:
  - We tekenen nu het punt **D** zijnde het punt na condensatie (op de kooklijn)
  - $p_D = p_C = 6,5 \text{ bar}$
  - $h_D = 60 \text{ kJ/kg}$  (aflezen via isenthalpe)
  - $s_D = 0,23 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$  (aflezen op de X-as)
  - $T_D = 25^\circ\text{C}$  (gegeven)



## 7.5. DE WERKELIJKE KOELKRINGLOOP

- Rekenvoorbeeld:
  - We tekenen nu het punt **A** zijnde het punt na expansie
  - $p_A = p_B = 0,7$  bar
  - $h_A = h_D = 60$  kJ/kg (expansie is isenthalpisch !)
  - $s_A = 0,26$  kJ/kg·K (aflezen op de X-as)
  - $T_A = -35^\circ\text{C}$  (gegeven)





# 7.5. DE WERKELIJKE KOELKRINGLOOP

- Rekenvoorbeeld:

- Efficiëntie van de werkelijke cyclus

$$\varepsilon = \frac{\text{opgenomen warmte}}{\text{compressorarbeid}} = \frac{h_B - h_A}{h_C - h_B}$$

$$= \frac{172 - 61}{223 - 172} = 2,18$$

- Efficiëntie van de omgekeerde Carnotcyclus

$$\varepsilon_c = \frac{T_K}{T_O - T_K} = \frac{(273 - 30)}{(273 + 15) - (273 - 30)} = 5.4$$

- Rendement

$$\eta = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} = \frac{2.176}{5.4} = 0.4$$

