

## Oefenopgaven Thermodynamica 2 (29-9-2010)

### Opgave 1.

Een stuk ijs van  $-20^{\circ}\text{C}$  en 1 atm wordt langzaam opgewarmd tot  $110^{\circ}\text{C}$ . De druk blijft hierbij constant. Schets hiervoor in een grafiek het verloop van de entropie, enthalpie en Gibbs vrije energie als functie van de temperatuur. Leg uit welke gegevens er nodig zijn om  $\Delta H$ ,  $\Delta G$  en  $\Delta S$  van dit proces te berekenen. Licht het antwoord toe.

### Opgave 2.

Voor vloeibaar water bij 298.15K en 1 atm zijn de volgende gegevens beschikbaar:

- de isobare uitzettingscoëfficiënt

$$\beta = \frac{1}{V} \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_p = 256 * 10^{-6} \text{ K}^{-1}$$

- 

$$\left( \frac{\partial \beta}{\partial T} \right)_p = 9.6 * 10^{-6} \text{ K}^{-2}$$

- het specifieke volume bij 298.15K en 1 atm =  $1.003 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$ .
- De molaire massa van water is 18.02 gram per mol.

Bereken hiermee de waarde van  $\left( \frac{\partial c_p}{\partial p} \right)_T$  en leid de gebruikte vergelijkingen af.

### Opgave 3.

In een turbine komt stikstof binnen bij een druk van 100 bar en 300K, de uitgaande stroom heeft een druk van 40 bar en een temperatuur van 245K.

De molmassa van stikstof bedraagt 28 gram per mol en  $c_p = 1 \text{ kJ}/(\text{K kg})$ . Stikstof kan worden beschouwd als een ideaal gas.

Bereken de geleverde arbeid en de entropieproductie van de turbine per kilogram geleverde stikstof. Laat duidelijk zien welke aannames u hebt gemaakt.

**Opgave 4.**

Dampspanningen van vloeistoffen worden vaak weergegeven door een zogenaamde Antoine-vergelijking:

$${}^{10}\log p = A - \frac{B}{T + C}$$

met

p: dampspanning in mm Hg (1 mm Hg = 1/750 bar)

T: temperatuur in K

A,B,C: constanten

Voor thiofeen (molmassa 84 gram per mol) vindt men:

$$A=6.94710$$

$$B=1238.618 \text{ K}$$

$$C=-52.702 \text{ K}$$

Bereken op basis van hiervan voor thiofeen:

- De verdampingsenthalpie en –entropie bij 298K en de evenwichtsdruk
- Het verschil  $c_p^{gas} - c_p^{vloeistof}$  bij 298K en de evenwichtsdruk

Laat duidelijk zien welke aannames u hebt gebruikt!

**Opgave 5.**

Van een bepaald gas wordt de toestandsvergelijking gegeven door:

$$p = \frac{a}{v - b}$$

Hierin is b een constante en v is het molaire volume,  $b < v$ .

- (a) Wat is de waarde van de term a in bovenstaande formule? Licht het antwoord toe.
- (b) Wat is de moleculaire interpretatie van de parameter b ?
- (c) Hangt de inwendige energie U van dit gas af van de druk? Licht het antwoord toe.
- (d) Hangt de soortelijke warmte bij constante druk ( $c_p$ ) van dit gas af van de druk? Licht het antwoord toe.
- (e) Leid voor dit gas een uitdrukking af voor  $c_p - c_v$
- (f) 1 mol van dit gas wordt reversibel en adiabatisch gecomprimeerd. Leid een formule af waarmee de verandering in temperatuur kan worden berekend, indien de verandering in druk klein is.
- (g) Dezelfde vraag als bij (f), maar dan voor een isenthalpische compressie.

**Opgave 6.**

Koolstofdioxide heeft een sublimatiedruk van 101.3 kPa bij  $t_1 = -78.2^\circ\text{C}$  en 202.6 kPa bij  $t_2 = -69.1^\circ\text{C}$ . Het punt waar damp, vloeistof en vaste fase met elkaar in evenwicht zijn ligt bij  $T = 216.58\text{K}$ . Maak een schatting van de tripelpuntsdruk en leg uit welke aannames u heeft gebruikt.

**Opgave 7.**

De stof 1,2-dichloorethaan gedraagt zich als een van der Waals gas met constanten  $a = 1.713\text{ m}^6\text{ Pa mol}^{-2}$  en  $b = 0.1086 \cdot 10^{-3}\text{ m}^3\text{ mol}^{-1}$  (zie vergelijking 11.2 van Moran&Shapiro). De soortelijke warmte bij constante druk bedraagt  $91.45\text{ J mol}^{-1}\text{ K}^{-1}$ .

Bereken, uitgaande van 1 mol van deze stof bij temperatuur  $T = 293.15\text{K}$  en volume  $V = 22 \cdot 10^{-3}\text{ m}^3$

- (a) de soortelijke warmte bij constant volume
- (b) de temperatuursverandering bij een oneindig kleine, reversibele adiabatische volumetoename.

**Opgave 8.**

In de technologie gebruikt men vaak enthalpie-druk diagrammen om het gedrag van een bepaalde stof tijdens een proces te beschrijven. In zo'n diagram vindt men lijnen, die het verband tussen de enthalpie  $H$  en druk  $p$  bij veranderende temperatuur beschrijven; enerzijds als het volume constant wordt gehouden ("isochoren"), anderzijds bij constante entropie ("isentropen"). In het  $H$ - $p$  diagram van ammoniak verlopen de isochoren en isentropen zodanig, dat beide een positieve helling hebben, doch dat de isochoren steiler verlopen dan de isentropen. Met andere woorden:

$$0 < \left( \frac{\partial H}{\partial p} \right)_s < \left( \frac{\partial H}{\partial p} \right)_v$$

De vraag rijst, of dit verschijnsel het gevolg is van speciale eigenschappen van ammoniak, dan wel of het voor ieder gas moet gelden. Laat zien, dat het in ieder geval voor een gas geldt, dat voldoet aan de toestandsvergelijking

$$p = \frac{RT}{v - b}$$

Hierin is  $b$  een constante en  $v$  is het molaire volume,  $b < v$ .  $R$ =gasconstante en  $T$ =absolute temperatuur.

**Opgave 9.**

Stikstof ondergaat een smoorproces. Bij een smoorproces wordt een gas door middel van een smoorklep ('throttle') expandeerd zonder arbeid te winnen. De begincondities zijn 410K en 10 bar en de einddruk is 0.1 bar. Het proces vindt plaats in een stationair proces. Veranderingen in de kinetische en potentiële energie zijn verwaarloosbaar. Het systeem is goed geïsoleerd. De molmassa van stikstof bedraagt 28 gram per mol en  $c_p=1$  kJ/(K kg). Stikstof kan worden beschouwd als een ideaal gas. Bereken de temperatuur van het uitstromende gas.

**Opgave 10.**

Het verband tussen druk, temperatuur en volume van gasvormig tricyclo octaan ( $C_8H_{12}$ ) wordt gegeven door

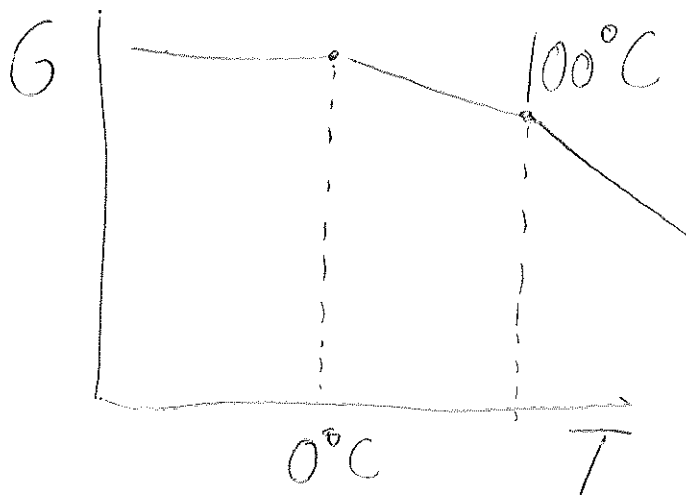
$$p = \frac{RT}{V}(1 + Bp)$$

Bij 273.15K is de waarde van  $B$ :  $0.219 \text{ bar}^{-1}$ .

Bij 323.15K is de waarde van  $B$ :  $0.111 \text{ bar}^{-1}$ .

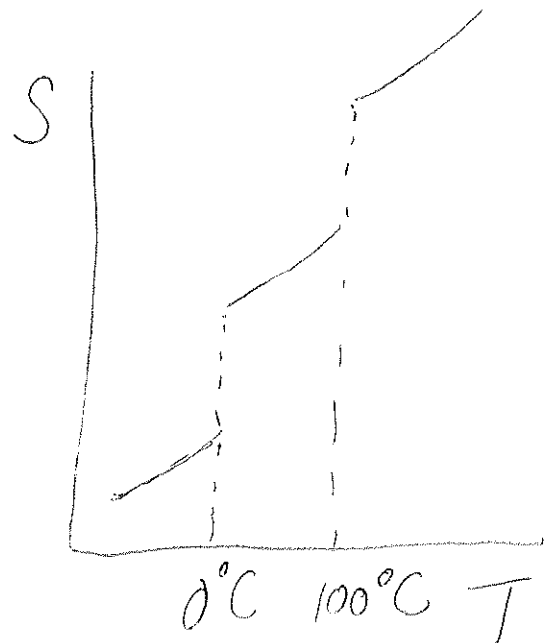
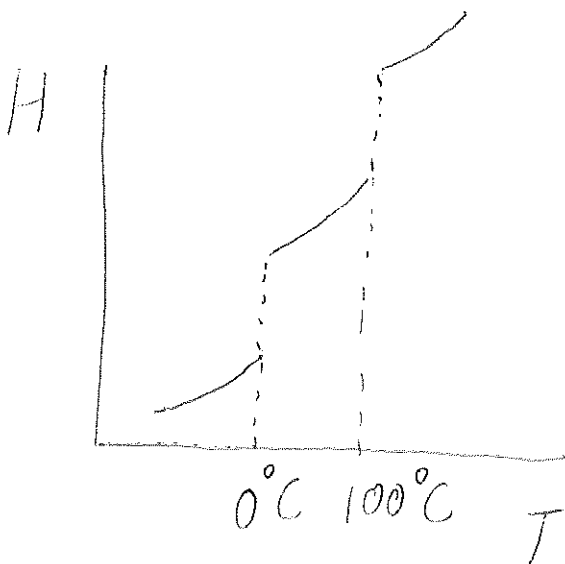
- Bereken op grond van deze gegevens de waarde van  $\ln(f/p)$  bij 1 bar van  $C_8H_{12}$  bij 273.15K en 323.15K. (NB:  $f$ =fugaciteit,  $p$ =druk).
- Uit de temperatuursafhankelijkheid van  $\ln(f/p)$  bij constante druk volgt een thermodynamische grootte. Welke is dat? Leid het desbetreffende verband af.

# Opgave 1



uit  $dG = -SdT + Vdp$   
volgt dat

$$\left(\frac{\partial G}{\partial T}\right)_p = -S$$



nodig voor een berekening zijn:

$C_p$  (vast)

$\Delta H_{\text{vast-vloeistof}}$

$C_p$  (vloeistof)

$\Delta H_{\text{vloeistof-damp}}$

$C_p$  (damp)

NB  $C_p = \left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_p$  ;  $\left(\frac{\partial S}{\partial T}\right)_p = \frac{C_p}{T}$

①

## Opgave 2

$$C_p = \left( \frac{\partial H}{\partial T} \right)_{P,N} ; \left( \frac{\partial C_p}{\partial P} \right)_{T,N} = \left( \frac{\partial}{\partial P} \left( \frac{\partial H}{\partial T} \right)_{P,N} \right)_{T,N}$$
$$= \left( \frac{\partial}{\partial T} \left( \frac{\partial H}{\partial P} \right)_{T,N} \right)_{P,N}$$

$$G = H - TS$$

$$\left( \frac{\partial G}{\partial P} \right)_{T,N} = \left( \frac{\partial H}{\partial P} \right)_{T,N} - T \left( \frac{\partial S}{\partial P} \right)_{T,N} \quad dG = -SdT + Vdp + \mu dn$$

dus  $\left( \frac{\partial G}{\partial P} \right)_{T,N} = V$

invullen:  $\left( \frac{\partial C_p}{\partial P} \right)_T = \left( \frac{\partial}{\partial T} \left[ V - T \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_{P,N} \right] \right)_{P,N}$  en  $\left( \frac{\partial S}{\partial P} \right)_{T,N} = - \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_{P,N}$

$$= -T \left( \frac{\partial^2 V}{\partial T^2} \right)_P = -T \left( \frac{\partial(\beta V)}{\partial T} \right)_{P,N}$$
$$= -TV \left( \beta^2 + \left( \frac{\partial \beta}{\partial T} \right)_{P,N} \right)$$

Invullen

$$\left( \frac{\partial C_p}{\partial P} \right)_T = (-300K) \cdot \left( 1.003 \cdot 10^{-6} \frac{m^3}{gram} \right) \cdot \left( 100.02 \frac{gram}{mol} \right)$$
$$\times \left( (256 \cdot 10^{-6})^2 + 9.6 \cdot 10^{-6} \right) K^2$$
$$= -5.2 \cdot 10^{-10} \frac{m^3}{K mol}$$

②

### Opgave 3

1<sup>e</sup> HW open systeem:

$$\frac{\dot{W}}{\dot{m}} = h_{in} - h_{uit}$$

aanname:  $C_p = \text{constant}$   
geen warmte verliezen  
 $\frac{C_p}{2} + 97$  klein

Ideaal gas; dus  $h_{in} - h_{uit} = C_p \Delta T$

$$\Rightarrow \frac{\dot{W}}{\dot{m}} = 1 \frac{\text{kJ}}{\text{K} \cdot \text{kg}} \cdot 55 \text{ K} = 55 \text{ kJ/kg}$$

2<sup>e</sup> HW open systeem

$$\frac{\dot{\sigma}}{\dot{m}} = S_{uit} - S_{in}$$

ideaal gas, dus  $C_p$   
is afhankelijk van  $p$

$$= \int_{T_{in}}^{T_{out}} \frac{C_p}{T} dT - \int_{P_{in}}^{P_{out}} \left( \frac{\partial h}{\partial T} \right)_p dp$$

$$= 1 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \cdot \ln \frac{245}{300} - \frac{8.314 \cdot 10^{-3} \text{ kJ mol}^{-1} \text{ K}^{-1}}{70 \cdot 10^{-3} \text{ kg mol}^{-1}}$$

$$= \ln \frac{2}{5}$$

$$= 1.09 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$$

(3)

## Opgave 4

$$\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_{\text{coex}} = \frac{\Delta H}{T \Delta V}$$

aanname  $\Delta V = V_g - V_l = V_g$   
ideaal gas  $V_g = \frac{RT}{p}$  (1 mol)

$$\Rightarrow \Delta H = RT^2 \left(\frac{\partial \ln p}{\partial T}\right)_{\text{coex}}$$

$$\ln p = (\ln 10) \cdot \left[ A - \frac{B}{T+C} \right]$$

$$\left(\frac{\partial \ln p}{\partial T}\right)_{\text{coex}} = \frac{(\ln 10) \cdot B}{(T+C)^2}$$

Invoeren waarden voor  $T = 290 \text{ K} \Rightarrow \Delta H = 34.9 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$

$$\Delta C_p = \left(\frac{\partial \Delta H}{\partial T}\right)_p = \frac{\partial}{\partial T} \frac{RT^2 B \ln 10}{(T+C)^2} \quad \boxed{\left(\frac{f}{g}\right)' = \frac{f'g - g'f}{g^2}}$$

$$= R \cdot B \cdot (\ln 10) \left[ \frac{2T(T+C)^2 - 2(T+C)T^2}{(T+C)^4} \right]$$

Invoeren waarden  $\Delta C_p = -50 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$

(4)



## Opgave 5

a) voor  $V \rightarrow \infty$  gaat een reëel gas over in een ideaal gas,  
dus  $a = RT$

b)  $V =$  "volume" van 1 mol moleculen

c)  $\left(\frac{\partial U}{\partial P}\right)_T$  ? uit  $G = H - TS$  volgt

$$\left(\frac{\partial G}{\partial P}\right)_{T,N} = \left(\frac{\partial H}{\partial P}\right)_{T,N} - T \left(\frac{\partial S}{\partial P}\right)_{T,N}$$

$$\left(\text{maxwell: } \left(\frac{\partial S}{\partial P}\right)_{T,N} = -\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_{P,N}\right)$$

$$\text{dus } \left(\frac{\partial H}{\partial P}\right)_{T,N} = V - T \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_{P,N}$$

Invullen  $H = U + PV$

$$\left(\frac{\partial U}{\partial P}\right)_{T,N} + P \left(\frac{\partial V}{\partial P}\right)_{T,N} + V = V - T \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_{P,N}$$

$$\Rightarrow \left(\frac{\partial U}{\partial P}\right)_{T,N} = -P \left(\frac{\partial V}{\partial P}\right)_{T,N} - T \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_{P,N}$$

$$\left(\frac{\partial V}{\partial P}\right)_{T,N} = -\frac{RT}{P^2} \quad \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_{P,N} = \frac{R}{P} \quad \left(\begin{array}{l} \text{NB} \\ V = b + \frac{RT}{P} \end{array}\right)$$

$$\text{invullen levert } \left(\frac{\partial U}{\partial P}\right)_{T,N} = \frac{PRT}{P^2} - \frac{RT}{P} = 0$$

(5)

$$d) \left( \frac{\partial C_p}{\partial P} \right)_{T,N}; C_p = \left( \frac{\partial H}{\partial T} \right)_{P,N}$$

$$\left( \frac{\partial C_p}{\partial P} \right)_{T,N} = \left( \frac{\partial}{\partial P} \left( \frac{\partial H}{\partial T} \right)_P \right)_T = \left( \frac{\partial}{\partial T} \left( \frac{\partial H}{\partial P} \right)_{T,N} \right)_{P,N}$$

reeds also gleich dass  $\left( \frac{\partial H}{\partial P} \right)_{T,N} = v - T \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_{P,N}$  dus

$$\begin{aligned} \left( \frac{\partial C_p}{\partial P} \right)_{T,N} &= \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_{P,N} - T \left( \frac{\partial^2 v}{\partial T^2} \right)_{P,N} - \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_{P,N} \\ &= -T \left( \frac{\partial^2 v}{\partial T^2} \right)_{P,N} \end{aligned}$$

$$v = b + \frac{RT}{P}; \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_{P,N} = \frac{R}{P}; \left( \frac{\partial^2 v}{\partial T^2} \right)_{P,N} = 0$$

$$\text{dus } \left( \frac{\partial C_p}{\partial P} \right)_{T,N} = 0$$

e) Eerder is afgeleid  $C_p - C_v = T \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_{P,N} \left( \frac{\partial P}{\partial T} \right)_{V,N}$

$$V = b + \frac{RT}{P}; \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_{P,N} = \frac{R}{P} \quad \text{en} \quad \left( \frac{\partial P}{\partial T} \right)_{V,N} = \frac{R}{V-b}$$

Invullen

$$C_p - C_v = T \cdot \frac{R}{P} \cdot \frac{R}{V-b} = \frac{R^2 T}{P(V-b)} = \frac{R^2 T(V-b)}{(V-b)RT} = R$$

f) min 1 regel

$$\left( \frac{\partial T}{\partial P} \right)_S \left( \frac{\partial P}{\partial S} \right)_T \left( \frac{\partial S}{\partial T} \right)_P = -1 \quad \left( \frac{\partial S}{\partial T} \right)_{P,N} = \frac{C_p}{T}$$

$$\text{en} \quad \left( \frac{\partial S}{\partial P} \right)_{T,N} = - \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_{P,N}$$

$$\text{Invullen} \quad \left( \frac{\partial T}{\partial P} \right)_S = \frac{T}{C_p} \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_P = \frac{RT}{P \cdot C_p} = \frac{V-b}{C_p}$$

g) min 1 regel

$$\left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_H \left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_P \left(\frac{\partial P}{\partial H}\right)_T = -1$$

$$\Rightarrow \left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_{H,N} = \frac{-1}{c_p} \left(\frac{\partial H}{\partial P}\right)_{T,N}$$

eerder afgeleid

$$\left(\frac{\partial H}{\partial P}\right)_{T,N} = V - T \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_{P,N}$$

Invallen  $\left(\frac{\partial H}{\partial P}\right)_{T,N} = V - \frac{RT}{P} = V - \frac{RT}{RT} (V - b)$   
 $= b$

das  $\left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_{H,N} = \frac{-b}{c_p}$

## Opgave 6

$$T_1 = 194,95 \text{ K} \rightarrow p_1^{\text{sat}} = 101,3 \text{ kPa}$$

$$T_2 = 204,05 \text{ K} \rightarrow p_2^{\text{sat}} = 202,6 \text{ kPa}$$

Gebruik Clausius-Clapeyron (aanname:  
zie boek 11.4)

$$\ln \frac{p_2}{p_1} = -\frac{\Delta h}{R} \left( \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \Rightarrow \frac{\Delta h}{R} = \frac{-\ln \frac{202,6}{101,3}}{\frac{1}{204,05} - \frac{1}{194,95}}$$
$$= +9,243 \text{ K}$$

$$\Rightarrow p_3 = p_2 \exp \left( -\frac{\Delta h}{R} \left( \frac{1}{T_3} - \frac{1}{T_2} \right) \right)$$
$$= 202,6 \exp \left( -9,243 \cdot \left( \frac{1}{216,88} - \frac{1}{204,05} \right) \right) \text{ kPa}$$
$$= 4700 \text{ kPa} = p_{\text{tripel}}$$

⑨

## Opgave 7

$$C_p - C_v = -T \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_p^2 \left( \frac{\partial P}{\partial V} \right) \quad (11.60)$$

voor een vdW gas: zie example 11.2 Moran & Shapiro

$$\left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_p = \frac{-R/V-b}{-RT/(V-b)^2 + 2a/V^3}$$

$$\left( \frac{\partial P}{\partial V} \right)_T = \frac{-RT}{(V-b)^2} + \frac{2a}{V^3}$$

Invullen:  $\left( \frac{\partial P}{\partial V} \right)_T = -4761570 \frac{\text{Pa}}{\text{m}^3}$

$$\left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_p = 7.97 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{K}$$

$$\Rightarrow C_p - C_v = 0.009 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1} \Rightarrow C_v = 0.756 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

$$\left( \frac{\partial T}{\partial V} \right)_s \quad ?) \quad \left( \frac{\partial T}{\partial V} \right)_s \left( \frac{\partial S}{\partial T} \right)_v \left( \frac{\partial V}{\partial S} \right)_T = -1$$

$$\Rightarrow \left( \frac{\partial T}{\partial V} \right)_s = \frac{-T}{C_v} \left( \frac{\partial S}{\partial V} \right)_T = \frac{-T}{C_v} \left( \frac{\partial P}{\partial T} \right)_v = \frac{-RT}{C_v(V-b)}$$

Invullen:  $\left( \frac{\partial T}{\partial V} \right)_s = -1349 \text{ K/m}^3$  (10)

## Opgave 8

$$dH = TdS + Vdp \Rightarrow \left(\frac{\partial H}{\partial p}\right)_S = V$$

$$\left(\frac{\partial H}{\partial p}\right)_V \quad ???$$

Met de definitie van  $G = H - TS$

$$\Rightarrow \left(\frac{\partial G}{\partial p}\right)_T = \left(\frac{\partial H}{\partial p}\right)_T - T\left(\frac{\partial S}{\partial p}\right)_T$$

Maxwell relatie:  $\left(\frac{\partial S}{\partial p}\right)_T = -\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p$

dan

$$\left(\frac{\partial H}{\partial p}\right)_T = V - T\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p$$

We willen echter weten  $\left(\frac{\partial H}{\partial p}\right)_V$

We schrijven  $H$  als functie van  $p$  en  $T$

$$dH = \left(\frac{\partial H}{\partial p}\right)_T dp + \left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_p dT$$

⑪

en we schrijven  $T$  als functie van  $P$  en  $V$

$$dT = \left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_V dP + \left(\frac{\partial T}{\partial V}\right)_P dV$$

dan

$$dH = \left(\frac{\partial H}{\partial P}\right)_T dP + \left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_P \left[ \left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_V dP + \left(\frac{\partial T}{\partial V}\right)_P dV \right]$$

indien  $dV = 0$

$$\left(\frac{\partial H}{\partial P}\right)_V = \left(\frac{\partial H}{\partial P}\right)_T + \left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_P \left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_V$$

$$= V - T \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P + C_P \left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_V$$

$$\text{Hier: } \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P = \frac{R}{P} \quad \text{en} \quad \left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_V = \frac{V-b}{R}$$

In het boek is afgeleid:

$$C_P - C_V = T \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P \left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_V \quad (11.66)$$

(12)



Invullen voor onze equation of state

$$C_p - C_v = R$$

alles invullen in de formule voor  $\left(\frac{\partial H}{\partial P}\right)_V$  lever

$$\left(\frac{\partial H}{\partial P}\right)_V = V - T \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P + C_p \left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_V$$

$$= V - \frac{RT}{P} + (C_v + R) \cdot \frac{T}{P}$$

$$= V + \frac{C_v \cdot T}{P}$$

$$\text{dus } \left(\frac{\partial H}{\partial P}\right)_V - \left(\frac{\partial H}{\partial P}\right)_S = \frac{C_v \cdot T}{P} > 0$$

## Opgave 9

uit de 1<sup>e</sup> HW volgt:  $h_{in} = h_{uit}$

Das het proces is isenthalpisch!

$$\left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_H \quad \text{en} \quad \left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_H \left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_P \left(\frac{\partial P}{\partial H}\right)_T = -1$$

$$\text{dus} \quad \left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_H = \frac{-1}{c_p \left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_T}$$

$$\text{Ideaal gas:} \quad \left(\frac{\partial H}{\partial P}\right)_T = v - T \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_P = 0 \quad \checkmark$$

$$\text{dus} \quad \left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_H = 0 \Rightarrow T_{in} = T_{uit} = 410 \text{ K}$$

heel flauw...

## Opgave 10

$$Z = \frac{pV}{RT} = 1 + Bp$$

$$\ln \frac{f}{p} = \int_0^p \frac{Z(p') - 1}{p'} dp' = Bp$$

$$T = 273.15 \text{ K en } 1 \text{ bar} \Rightarrow \ln \frac{f}{p} = 0.219$$

$$T = 323.15 \text{ K en } 1 \text{ bar} \Rightarrow \ln \frac{f}{p} = 0.111$$

$$\mu = \mu_0 + RT \ln f$$

$$\mu^{IG} = \mu_0 + RT \ln p$$

$$\Rightarrow \ln \frac{f}{p} = \frac{\mu - \mu^{IG}}{RT}$$

$$\left( \frac{\partial \ln \frac{f}{p}}{\partial T} \right)_p = \left( \frac{\partial \frac{\mu - \mu^{IG}}{RT}}{\partial T} \right)_p = - \frac{H - H^{IG}}{RT^2}$$

$\Rightarrow H - H^{IG} = \text{enthalpie} - (\text{enthalpie als het systeem een ideaal gas zou zijn})$

(15)