

Tentamen KFKA05, 26 oktober 2016

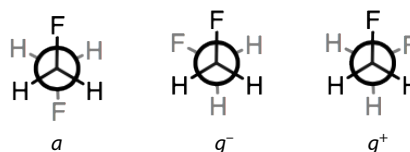
Tillåtna hjälpmedel: Miniräknare (med tillhörande handbok), utdelat formelblad med tabellsamling samt SI Chemical Data och TEFYMA eller motsvarande.

Alla beräkningar skall utföras så noggrant som möjligt utifrån de förutsättningar som ges i uppgiften och tillgängliga data i tabellsamling. Slutsatser skall motiveras samt approximationer och beräkningar redovisas. Tag för vana att alltid göra en rimlighetsbedömning.

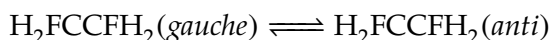
För godkänt krävs att totala poängantalet på tentamen och eventuell inlämningsuppgift är minst 30.

1. I ett experiment (Durig *et al*, *J Phys Chem* **1992**, 96, 8224) mättes populationerna av *anti*-isomeren (*a*) och de två osärskiljbara *gauche*-isomererna (g^- och g^+) för 1,2-difluoroetan (H_2FCCFH_2) vid 25°C till

p_a	p_{g^-}	p_{g^+}
0,10	0,45	0,45



- (a) Beräkna entropin över fördelningen $a/g^-/g^+$ för en mol 1,2-difluoroetanmolekyler.
- (b) Vad skulle entropin över fördelningen varit om det tre tillstånd vore lika sannolika?
- (6 p)
2. En anomali (underlighet) i den organiska kemin är att för vissa molekyler har *gauche*-isomererna lägre energi än *anti*-isomeren. Orsaken till detta har förbryllat kvantkemisterna. Ett exempel är molekylen 1,2-difluoroetan i uppgift 1.
- Använd tabell från uppgift 1 för att bestämma energiskillnaden mellan *anti*- och *gauche*-isomererna. Degenerationsfaktorn är 1 för alla tre tillstånd. Ange svaret i kJ/mol.
- (6 p)
3. I artikeln som hänvisades till i uppgift 1 mättes jämviktskonstanten ($K = p_a/p_g$ med $p_g = p_{g^-} + p_{g^+}$) för gasfasjämvikten



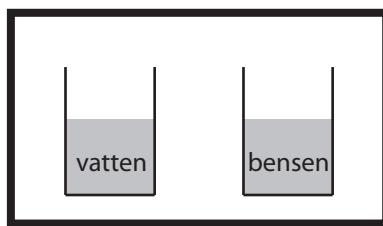
vid några olika temperaturer. Man fann

$T / ^\circ\text{C}$	24	34	46	56	79	92
K	0,110	0,115	0,125	0,130	0,136	0,149

- (a) Beräkna $\Delta_r H^\ominus$ och $\Delta_r S^\ominus$ för reaktionen under antagandet att bägge är temperaturoberoende.
- (b) Du kommer att finna att $\Delta_r S^\ominus$ är ganska nära $-R \ln 2$. Varför?
- (6 p)
4. Beräkna $C_{p,m}^\ominus$ och $S_m^\ominus$ för $\text{H}_2(\text{g})$ vid 298 K med hjälp av statistisk mekanik.
- (6 p)

5. I en artikel publicerad år 1916 (*Proc Roy Soc* **1916**, 92, 477), som för övrigt inleds med orden "the following communication is a record of the experiments made up to the time when Mr Hartley left the laboratory on account of the war", bestämdes molmassan för sukros. Man blandade 10,18 g sukros med 100,0 g vatten och mätte det osmotiska trycket i lösningen till 8,85 atm vid 0°C.
- (a) Bestäm molmassan för sukros från dessa data.
 - (b) Vi vet idag att molmassan för sukros är 343,2 g/mol. Beräkna aktivitetsfaktorn för vatten i lösningen.
- (6 p)
6. Du vill bygga ett ångkraftverk drivet av solenergi och från en nyligen avklarad kurs i termodynamik kommer du ihåg att du bör sträva efter att göra alla delprocesser så reversibla som möjligt. Du har sålunda en behållare med flytande vatten där du kan tillföra värme vid vattnets kokpunkt, så att vattnet förångas och pressar ut en kolv mot ett yttre tryck och därmed utför ett arbete.
- (a) Beräkna arbetet som utförs på omgivningen när 1 kg vatten förångas mot yttre trycket 2 bar där kokpunkten är 120,7°C.
 - (b) Beräkna ΔH , ΔS och ΔU för vattnet under samma process. Du får approximera värmekapaciteterna som konstanta i temperaturintervall. (På tentan angavs även muntligt att man får ansätta att entalpin är tryckoberoende pga mycket små Joule–Thomson-koefficienter för både vätskan och ångan.)
- (6 p)
7. Vi placerar 0,3 mol ideal gas vid 298 K och 1 bar i en värmeisolerad behållare med en rörlig kolv som kan låsas fast. Den molära värmekapaciteten för gasen, $C_{V,m} = 20 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$, kan antas vara oberoende av temperaturen. Värme kan tillföras med hjälp av en elektrisk motståndstråd inne i behållaren. Trycket utanför behållaren är hela tiden 1 bar.
- (a) Vi börjar med att hålla kolven fastlåst (konstant V) och tillför 600 J värme med hjälp av tråden. Beräkna gasens temperatur och tryck efter detta.
 - (b) Därefter lossar vi kolven så att gasen får expandera adiabatiskt mot det konstanta trycket 1 bar. Beräkna gasens temperatur efter detta.
 - (c) I ett annat experiment startar vi från det ursprungliga tillståndet men lossar kolven från början och tillför samma värmemängd, 600 J, under konstant tryck. Beräkna gasens sluttemperatur i detta experiment.
- (6 p)

8. Figuren nedan visar en bägare med bensen och en med vatten som är placerade inuti en sluten behållare vid 25°C. Jämvikt råder.



- (a) Beräkna partialtrycken av både bensen och vatten i behållaren. Mängderna bensen i vattnet och vatten i bensen är mycket små och får försummas i denna deluppgift.
- (b) Beräkna koncentrationen bensen i vattenlösningen, uttryckt i mg per kg vatten.
- (6 p)
9. Dikväveoxid (N_2O), som också kallas lustgas, är en av de gaser som bidrar mest till växthuseffekten, trots att molbråket i atmosfären bara är ca $0,5 \cdot 10^{-6}$. Den ska inte förväxlas med kvävedioxid (NO_2), som istället bidrar till förorening och har ett molbråk på $0,02 \cdot 10^{-6}$ i atmosfären. Dessa båda gaser står i jämvikt med en mindre förekommande gas, kvävemonoxid (NO), enligt följande reaktionsformel:
- $$\text{N}_2\text{O}(\text{g}) + \text{NO}_2(\text{g}) \rightleftharpoons 3\text{NO}(\text{g}) \quad \Delta_r G^\circ(298 \text{ K}) = 104,2 \text{ kJ mol}^{-1}$$
- (a) Beräkna molbråket för NO i atmosfären vid 298 K och totaltrycket 1 bar, om vi förutsätter att reaktionen är i jämvikt.
- (b) En mängd atmosfärluft (298 K, 1 bar) förs in i en sluten behållare där totaltrycket kan ändras utan att ändra temperaturen. Om vi vill öka molbråket för NO , bör vi då öka eller minska totaltrycket?
- (c) Vid vilket totaltryck skulle molbråken av NO och NO_2 bli lika stora i behållaren? Alla andra reaktioner kan försummas.
- (6 p)
10. (a) Visa att expansionskoefficienten kan beräknas ur densiteten ρ enligt

$$\alpha = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p$$

- (b) I intervallet 0°C till 30°C vid trycket 1 atm beskrivs densiteten (i enheten mol/l) av flytande vatten väl av

$$\rho = 85,729 - 7,2774 \cdot 10^{-2}T - \frac{7,7221 \cdot 10^5}{T^2}$$

där T är temperaturen i K. Utnyttja detta för att ta fram ett uttryck för hur α beror av temperaturen för flytande vatten i intervallet 0°C till 30°C.

- (c) Bestäm den temperatur där $\alpha = 0$.
- (d) Beräkna expansionskoefficienten vid 1°C.
- (6 p)

Lösningar KFKA05, 2016-10-26

OBS! Det kan ännu finnas felräkningar i nedanstående lösningar!

- (a) $S = -1R \sum_i p_i \ln p_i = 7,89 \text{ J K}^{-1}$.
 (b) $S = -1R \cdot 3 \cdot (1/3) \ln(1/3) = R \ln 3 = 9,13 \text{ J K}^{-1}$.
- Boltzmanns fördelningslag taget för populationerna p_a/p_{g^-} är

$$\frac{p_a}{p_{g^-}} = \frac{0,1}{0,45} = \frac{1}{1} \cdot e^{-\Delta E/(RT)}$$

Vi löser ut $\Delta E = E_a - E_{g^-} = 3,7 \text{ kJ mol}^{-1}$. Naturligtvis är $E_a - E_{g^+}$ också lika med $3,7 \text{ kJ mol}^{-1}$. Observera att man inte behöver räkna ut q !

Man kan så klart även räkna med totalpopulationen *gauche*, $p_g = p_{g^-} + p_{g^+} = 0,9$, men måste då tänka på att degenerationsgraden för *gauche*-tillståndet är 2

$$\frac{p_a}{p_g} = \frac{0,1}{0,9} = \frac{1}{2} \cdot e^{-\Delta E/(RT)}$$

Energiskillnaden blir naturligtvis densamma ($0,9/2 = 0,45$).

- (a) Linjär regression av $\ln K$ mot $1/T$ ger $\Delta_r H^\ominus = 3,8 \text{ kJ mol}^{-1}$ och $\Delta_r S^\ominus = -5,6 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$ (lutningen $-\Delta_r H^\ominus/R = -454 \text{ K}$ och interceptet $\Delta_r S^\ominus/R = -0,674$).
 (b) Det finns två *gauche*-tillstånd, dvs två tillstånd fler på reaktant-sidan än produktsidan. Det ger ett bidrag till reaktionsentropin som är precis $-R \ln 2 = -5,76 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$. Att inte reaktionsentropin har exakt detta värde kan så klart bero på mätfel och/eller att de olika konformationerna har lite olika entropi (t.ex. att de har lite olika rotations- och vibrationsnivåer).
- Eftersom $T = 298 \text{ K}$ är tämligen mycket större än θ_{rot} och väldigt mycket mindre än θ_{vib} för H_2 , är $C_{p,m} = (7/2)R = 29,10 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$. Detta stämmer också ganska väl med det experimentella värdet.¹

För att beräkna entropin behöver vi de olika tillståndssummorna. Vi får $\Lambda^3 = 3,614 \cdot 10^{-31} \text{ m}^3$, så att $q_{\text{trans}} = RT/(p^\ominus \cdot \Lambda^3) = 6,857 \cdot 10^{28}$. $q_{\text{rot}} = 298/(2 \cdot 87,53) = 1,702$ och $q_{\text{vib}} = 1,000$. Detta ger

$$\begin{aligned} k_B \ln Q &= k_B \mathcal{N}_A \cdot (\ln q_{\text{trans}} - \ln \mathcal{N}_A + 1 + \ln q_{\text{rot}} + \ln q_{\text{vib}}) \\ &= R \cdot (\ln q_{\text{trans}} - \ln \mathcal{N}_A + 1 + \ln q_{\text{rot}} + \ln q_{\text{vib}}) = 109,54 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1} \end{aligned}$$

Alltså är

$$S^\ominus = k_B \ln Q + \frac{\Delta U}{T} = 109,54 + \frac{5R}{2} = 130,33 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$$

¹Det experimentella värdet är $28,82 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$. Orsaken till att de beräknade värdena stämmer lite sämre med de experimentella än vad vi är vana vid är en kombination av att θ_{rot} är ganska stor och att H_2 består av två olika spin-isomerer: ortoväte där de bägge elektronerna har parallella spinn (75%) och paraväte (25%) där elektronerna har motriktade spinn. De bägge formerna har olika rotationstillståndssummor vilket gör att de får olika C_V - och S -värden. Detta är såklart jätteöverkurs (vi har överhuvudtaget inte pratat om det på kursen) men någon student kanske är nyfiken.

5. Molära volymen för vatten är $v_{\text{H}_2\text{O}}^* = 1,802 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{mol}$. Det ger att aktiviteten för vattnet är $a_{\text{H}_2\text{O}} = \gamma_{\text{H}_2\text{O}} x_{\text{H}_2\text{O}} = e^{-\Pi v_{\text{H}_2\text{O}}^*/(R \cdot 273,15)} = 0,99291$. Antalet mol vatten är $100/18,015 = 5,55$.

(a) Under approximationen att aktivitetsfaktorn är 1, har vi alltså

$$0,99291 = \frac{n_{\text{H}_2\text{O}}}{n_{\text{sukros}} + n_{\text{H}_2\text{O}}} = \frac{n_{\text{H}_2\text{O}}}{m_{\text{sukros}}/M_{\text{sukros}} + n_{\text{H}_2\text{O}}}$$

Vi löser ut sukros molmassa och får $M_{\text{sukros}} = 256,9 \text{ g/mol}$.

(b) Det verkliga molbråket vatten är

$$x_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{n_{\text{H}_2\text{O}}}{n_{\text{sukros}} + n_{\text{H}_2\text{O}}} = \frac{n_{\text{H}_2\text{O}}}{m_{\text{sukros}}/M_{\text{sukros}} + n_{\text{H}_2\text{O}}} = 0,9947$$

Alltså är aktivitetsfaktorn $\gamma_{\text{H}_2\text{O}} = a_{\text{H}_2\text{O}}/x_{\text{H}_2\text{O}} = 0,998$. Vatten "trivs" alltså ganska bra i närvaro av sukros.

6. Vi har 55,33 mol vatten.

(a) Arbetet är

$$w = - \int_{\text{vap}} p_{\text{ex}} dV = -p_{\text{ex}} \int_{V(l)}^{V(g)} dV = -p_{\text{ex}} \cdot (V(g) - V(l)) = -p_{\text{ex}} \cdot \left(\frac{nRT}{p_{\text{ex}}} - \frac{1}{\rho(l)} \right) = -0,181 \text{ MJ}$$

Här är vätskans volym så mycket mindre än gasens att den egentligen kan försummas.

Eftersom uppgiften innehöll ordet reversibel, satte vissa studenter reflexmässigt $-p_{\text{ex}} dV = -p dV = -(nRT/V) dV$ (som vid adiabatisk reversibel expansion av en ideal gas). De som gjorde det hade förmodligen glömt bort att förångning av vatten vid kokpunkten är en reversibel process vid konstant p_{ex} . Detta blir dessutom "dubbelfel" eftersom flytande vatten absolut inte följer ideala gaslagen.

- (b) ΔH beror inte nämvärt på trycket eftersom Joule-Thomsonkoefficienterna är små för både vätskan och gasen. Det mesta av skillnaden mellan $\Delta_{\text{vap}}H(2 \text{ bar}, 120,9^\circ\text{C})$ och $\Delta_{\text{vap}}H(1 \text{ atm}, 100^\circ\text{C})$ härrör därför av temperaturändringen. Vi får

$$\begin{aligned} \Delta_{\text{vap}}H(2 \text{ bar}, 120,9^\circ\text{C}) &= \\ \Delta_{\text{vap}}H(2 \text{ bar}, 100^\circ\text{C}) &+ \int_{100^\circ\text{C}}^{120,9^\circ\text{C}} (C_{p,m}(g) - C_{p,m}(l)) dT \approx \\ \Delta_{\text{vap}}H(1 \text{ atm}, 100^\circ\text{C}) &+ (33,58 - 75,37) \cdot 20,9 = \\ &39,79 \text{ kJ mol}^{-1} \end{aligned}$$

Alltså är $\Delta H = 55,33 \cdot 39,79 = 2,20 \text{ MJ}$.

Observera att ΔS är tryckberoende men eftersom processen utförs reversibelt vid konstant T och p kan vi enkelt nyttja $\Delta S = \int dq_{\text{rev}}/T = q/T = \Delta H/T = 5,59 \text{ kJ K}^{-1}$.²

Till sist har vi ($p = p_{\text{ex}}$ hela tiden)

$$\Delta U = \Delta H - \Delta(pV) = \Delta H - p_{\text{ex}}\Delta V = \Delta H + w = 2,02 \text{ MJ}$$

7. (a) Konstant volym ger $\Delta U = q = C_V \cdot \Delta T$, så att $T = 298 + \Delta T = 298 + 600/(0,3 \cdot C_{V,m}) = 398 \text{ K}$.

Trycket fås med ideala gaslagen: $p = nR \cdot 398/V = nR \cdot 398/(nR \cdot 298/(1 \cdot 10^5)) = 1 \cdot 10^5 \cdot 398/298 = 1,34 \text{ bar}$.

- (b) $C_V dT = -p_{\text{ex}} dV$ (adiabatisk expansion mot konstant tryck $p_{\text{ex}} = 1 \text{ bar}$) ger

$$C_{V,m} \cdot (T - 398) = -p_{\text{ex}} \left(\frac{RT}{p_{\text{ex}}} - \frac{R \cdot 398}{1,34 \text{ bar}} \right)$$

Vi löser ut $T = 369 \text{ K}$.

- (c) Konstant tryck ger $\Delta H = q = C_p \cdot \Delta T$, så att $T = 298 + \Delta T = 298 + 600/(0,3 \cdot C_{p,m}) = 369 \text{ K}$.

8. (a) Clausius–Clapeyrons ekvation ger $p_{\text{H}_2\text{O}} = 0,037 \text{ atm} = 0,038 \text{ bar}$ och $p_{\text{bensen}} = 0,145 \text{ atm} = 0,146 \text{ bar}$ om man nyttjar $\Delta_{\text{vap}}H$ vid ämnernas respektive kokpunkter. Detta blir dock något approximativa värden eftersom $\Delta_{\text{vap}}H$ beror av temperaturen.

Några studenter nyttjade elegant att jämviktskonstanten för fasjämvikten $\text{C}_6\text{H}_6(\text{l}) \rightleftharpoons \text{C}_6\text{H}_6(\text{g})$ är $K = p/p^\ominus$ (eftersom aktiviteten för den rena vätskan är 1). Motsvarande gäller förstås för vattnet. Sedan kan $p = K \cdot p^\ominus$ beräknas ur $\Delta G^\ominus = -RT \ln K$, med $\Delta G^\ominus = \Delta_f G^\ominus(\text{g}) - \Delta_f G^\ominus(\text{l})$ taget från tabellsamlingen, där ju $\Delta_f G^\ominus$ är givna vid just 298 K .

- (b) Henrys lag med trycket av bensen enligt ovan ger $x_{\text{bensen}} = 2,66 \cdot 10^{-5}$. Detta motsvarar 115 mg/kg vatten.

²Detta är det enklaste sättet att räkna ut ΔS . Man kan också "flytta" ΔS från 1 atm och 100°C till det nya trycket och temperaturen men måste då även ta hänsyn till att entropin för gasfasen beror av trycket även om Joule–Thomsonkoefficienten är nära noll eftersom $dS = -(V/T) dp = -(nR/p) dp$. För vätskan är S nästan tryckoberoende eftersom volymen endast är svagt tryckberoende: $\Delta_{\text{vap}}S(2 \text{ bar}, 120,9^\circ\text{C}) \approx \Delta_{\text{vap}}S(1 \text{ atm}, 100^\circ\text{C}) + \int_{100^\circ\text{C}}^{120,9^\circ\text{C}} (\Delta C_{p,m}/T) dT + \int_{1 \text{ atm}}^{2 \text{ bar}} (-R/p) dp$.

9. Jämviktskonstanten är

$$K = \frac{(p_{\text{NO}}/p^\ominus)^3}{p_{\text{N}_2\text{O}}/p^\ominus \cdot p_{\text{NO}_2}/p^\ominus} = \frac{(x_{\text{NO}}p_{\text{tot}}/p^\ominus)^3}{x_{\text{N}_2\text{O}}p_{\text{tot}}/p^\ominus \cdot x_{\text{NO}_2}p_{\text{tot}}/p^\ominus} = \frac{x_{\text{NO}}^3 \cdot p_{\text{tot}}/p^\ominus}{x_{\text{N}_2\text{O}} \cdot x_{\text{NO}_2}}$$

där $K = \exp(-\Delta_r G^\ominus/(RT)) = 5,44 \cdot 10^{-19}$. Jämvikten är alltså mycket långt förskjuten åt vänster.

(a) Alltså har vi (ty $p_{\text{tot}}/p^\ominus = 1$ vid totaltrycket 1 bar)

$$x_{\text{NO}} = \sqrt[3]{K \cdot 0,5 \cdot 10^{-6} \cdot 0,02 \cdot 10^{-6}} = 1,8 \cdot 10^{-11}$$

alltså en mycket liten halt.

(b) Le Chateliers princip säger att om vi förändrar trycket kommer jämvikten att förskjutas på ett sådant sätt att tryckändringen motverkas. Eftersom trycket kan ökas om jämvikten förskjuts åt höger, skall trycket sänkas för att bilda mer NO. Man ser också detta direkt på K . En ökning av x_{NO} täljaren kan åstadkommas genom en sänkning av totaltrycket (K skall ju vara konstant).

(c) Eftersom nästan all gas i behållaren är luft är det en mycket god ansats att säga att molbråken av alla tre gaserna är direkt proportionella (med samma proportionalitetskonstant n_{luft}^{-1}) mot antalet mol av gasen. T.ex:

$$x_{\text{NO}} = \frac{n_{\text{NO}}}{n_{\text{NO}} + n_{\text{NO}_2} + n_{\text{N}_2\text{O}} + n_{\text{luft}}} \approx \frac{n_{\text{NO}}}{n_{\text{luft}}}$$

Alltså är det så att om molbråket NO_2 minskar med Δx så ökar molbråket NO med $3 \cdot \Delta x$ vid en förskjutning av jämvikten. Alltså kommer molbråket NO att vara $x_{\text{NO}} = 1,8 \cdot 10^{-11} + 3\Delta x$, $x_{\text{N}_2\text{O}} = 0,5 \cdot 10^{-6} - \Delta x$ och $x_{\text{NO}_2} = 0,02 \cdot 10^{-6} - \Delta x$. Vi söker det tryck då NO och NO_2 är lika, dvs

$$1,8 \cdot 10^{-11} + 3 \cdot \Delta x = 0,02 \cdot 10^{-6} - \Delta x$$

vilket ger $\Delta x = 5,00 \cdot 10^{-9}$ och de nya jämviktsmolbråken $x_{\text{N}_2\text{O}} = 4,95 \cdot 10^{-7}$ och $x_{\text{NO}} = x_{\text{NO}_2} = 1,50 \cdot 10^{-8}$. Alltså behöver totaltrycket uppfylla

$$K = \frac{(1,50 \cdot 10^{-8})^3 \cdot p_{\text{tot}}/p^\ominus}{(4,95 \cdot 10^{-7}) \cdot (1,50 \cdot 10^{-8})}$$

vilket ger $p_{\text{tot}} = 1,2 \cdot 10^{-9} \text{ bar} = 0,12 \text{ mPa}$.

10. (a) Volymen är relaterad till densiteten genom $V = n/\rho$ (här mäter vi densiteten i enheten mol/m³ men det blir exakt samma sluttuttryck om man använder kg/m³). Alltså är $\left(\frac{\partial V}{\partial \rho}\right)_p = -n/\rho^2$. Således har vi med hjälp av kedjeregeln

$$\alpha = \frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p = \frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial \rho}\right)_p \left(\frac{\partial \rho}{\partial T}\right)_p = -\frac{\rho}{n} \cdot \frac{n}{\rho^2} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T}\right)_p = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T}\right)_p$$

V.S.B.

- (b) Enligt uppgiften är

$$\left(\frac{\partial \rho}{\partial T}\right)_p = -7,2774 \cdot 10^{-2} + \frac{2 \cdot 7,7221 \cdot 10^5}{T^3}$$

så att

$$\alpha = \frac{7,2774 \cdot 10^{-2} - 2 \cdot 7,7221 \cdot 10^5 / T^3}{85,729 - 7,2774 \cdot 10^{-2} T - 7,7221 \cdot 10^5 / T^2}$$

- (c) Att $\alpha = 0$ betyder att ρ har en extrempunkt, så man kan lösa denna genom att antingen numeriskt finna max eller min av $\rho(T)$ eller genom att leta efter $\alpha = 0$. Vi väljer det senare eftersom vi är duktiga på Solver. Sätt uttrycket (eller bara täljaren, vilket är enklare) från (b) lika med 0 och lös ut $T = 277,9 \text{ K} = 3,7^\circ\text{C}$.
- (d) $\alpha(1^\circ\text{C}) = -3,9 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$, vilket inte är oväntat. Vi vet ju att V minskar med T för vatten mellan 0°C och $4 (3,7)^\circ\text{C}$.