



Name: .....

Matrikelnummer:.....

Lehrveranstaltung: **Physikalische Chemie I**

Prüfungsnummer: **310251**

Datum:

Aufgabe 1: Reale und ideale Gase...../6 Punkte

Aufgabe 2: Thermochemie...../6 Punkte

Aufgabe 3: Gleichgewicht...../7 Punkte

Aufgabe 4: Thermodynamik...../6 Punkte

Extrapunkte (bitte ausfüllen, falls zutreffend)

( ) alle ILIAS Tests bestanden

/5 Punkte

Die Aufgaben gelten nur dann als gelöst, wenn der Lösungsweg klar nachvollziehbar ist und Vorzeichen, Zahlenwert und Einheit des Endergebnisses korrekt sind. Beachten Sie beim Endergebnis die Anzahl der signifikanten Stellen!

**Erlaubte Hilfsmittel:** Lehrbuch zum Kurs (*Physikalische Chemie kompakt*),  
eigenhändig geschriebene Formelsammlung, Taschenrechner

|        |         |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |
|--------|---------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Note   | 5,0     | 4,0        | 3,7        | 3,3        | 3,0        | 2,7        | 2,3        | 2,0        | 1,7        | 1,3        | 1,0        |
| %      |         |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |
| Punkte | <<br>10 | ab<br>10,0 | ab<br>11,5 | ab<br>13,0 | ab<br>14,5 | ab<br>16,0 | ab<br>17,5 | ab<br>19,0 | ab<br>20,5 | ab<br>22,0 | ab<br>23,5 |



## Aufgabe 1: Reale und ideale Gase

1,00 kg Wasserstoff ( $\text{H}_2$ ) liegen bei Standardbedingungen (0.00 °C, 100 kPa) vor (Zustand I).

Das Gas wird zunächst isotherm reversibel auf 20.0 MPa komprimiert (Zustand II).

Anschließend wird das Gas inenthalpisch (Joule-Thomson-Experiment) auf 100 kPa gedrosselt (Zustand III).

- a) Berechnen Sie das **Volumen  $V_I$**  des Gases in Zustand I (Gas verhält sich ideal).
- b) Berechnen Sie die **Arbeit  $w$** , welche zur Kompression des Gases von I nach II aufzuwenden ist (Gas verhält sich ideal).
- c) Berechnen Sie die **Dichte  $\rho$**  des Gases in Zustand II (Gas verhält sich ideal).
- d) Berechnen Sie die **mittlere Geschwindigkeit  $\langle v \rangle$**  der Wasserstoff-Moleküle in Zustand II.
- e) Berechnen Sie den **Joule-Thomson-Koeffizient  $\mu_{J-T}$**  des Gases in Zustand II (Gas verhält sich entsprechend der van-der-Waals-Gleichung).
- f) Berechnen Sie die **Temperatur  $T_{III}$**  des Gases nach der isenthalpen Drosselung in Zustand III (Gas verhält sich entsprechend der van-der-Waals-Gleichung).

|                     |
|---------------------|
| $V_I$               |
| $w$                 |
| $\rho$              |
| $\langle v \rangle$ |
| $\mu_{J-T}$         |
| $T_{III}$           |

6 Punkte, davon erreicht:

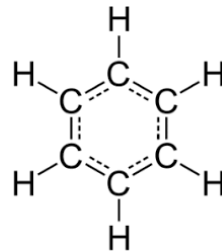


## Aufgabe 2: Thermochemie

Benzol (andere Bezeichnung: Benzen) ist ein cyclischer Kohlenwasserstoff der Formel  $C_6H_6$ . Das Molekül besteht aus 6 C-H- und 6 C-C-Bindungen. Die 6 C-C-Bindungen sind identisch (gleiche Bindungsenergie, gleiche Bindungslänge).

**a)** Skizzieren Sie ein **Enthalpiediagramm** (25.0 °C, 100 kPa) mit folgenden 3 Niveaus:

- (I) Gasförmiges Benzol:  
 $C_6H_6(g)$
- (II) Elemente, aus denen Benzol besteht:  
 $6 C(s, \text{graphite}) + 3 H_2(g)$
- (III) Atome, aus denen Benzol besteht:  
 $6 C(g) + 6 H(g)$



- b)** Berechnen Sie die **Enthalpien** von Niveau (I) und (III) aus Tabellenwerten (Anhang).
- c)** Berechnen Sie die **Atomisierungsenthalpie** von gasförmigem Benzol.
- d)** Berechnen Sie die **Bindungsenthalpie** einer C-C Bindung im Benzol. Nutzen Sie bei Ihrer Berechnung für jede C-H Bindung im Benzol die Bindungsenthalpie (– 413 kJ/mol).

### Enthalpiediagramm



Enthalpie Benzol:

Enthalpie Atome:

Atomisierungsenthalpie:

Bindungsenthalpie C – C im Benzol:

6 Punkte, davon erreicht:



### Aufgabe 3: Gleichgewicht

Ethanoldampf kann zu Wasserdampf und Ethylen (Ethen) reagieren („Dehydratisierung“):



- a) Berechnen Sie die molare **Reaktionsenthalpie**  $\Delta_r H^\circ$  bei 25°C für die Dehydratisierung.
- b) Berechnen Sie die molare **Reaktionsentropie**  $\Delta_r S^\circ$  bei 25°C für die Dehydratisierung.
- c) Berechnen Sie den molaren **Antrieb** (die molare **freie Reaktionsenthalpie**  $\Delta_r G^\circ$ ) bei 25°C für diese Reaktion.
- d) Berechnen Sie die thermodynamische **Gleichgewichtskonstante**  $K_{eq}$  dieser Reaktion bei 25°C.
- e) Wie wirkt sich eine **Erhöhung der Temperatur** auf die Ausbeute an Ethylen aus?
- f) Wie wirkt sich eine **Erhöhung des Drucks** auf die Ausbeute an Ethylen aus?

|                                         |                 |                  |              |
|-----------------------------------------|-----------------|------------------|--------------|
| $\Delta_r H^\circ (25^\circ\text{C}) =$ |                 |                  |              |
| $\Delta_r S^\circ (25^\circ\text{C}) =$ |                 |                  |              |
| $\Delta_r G^\circ (25^\circ\text{C}) =$ |                 |                  |              |
| $K_{eq}(25^\circ\text{C}) =$            |                 |                  |              |
| <b>Ausbeute bei Temperaturerhöhung:</b> | <i>geringer</i> | <i>identisch</i> | <i>höher</i> |
| <b>Ausbeute bei Druckerhöhung:</b>      | <i>geringer</i> | <i>identisch</i> | <i>höher</i> |

7 Punkte, davon erreicht:



## Aufgabe 4: Thermodynamik

Gegeben ist 1.00 mol flüssiges Wasser bei 25.0 °C und 100 kPa.

Dem Wasser wird isobar kontinuierlich Wärme entzogen, bis es schließlich bei 0.00 °C komplett zu Eis gefroren ist.

In Anhang finden Sie alle relevanten Stoffdaten von Wasser.

- a) Berechnen Sie die **Bildungs-Enthalpie**  $\Delta_f H(l)$  von flüssigem Wasser bei 0.00 °C und 100 kPa.
- b) Berechnen Sie die **Bildungs-Enthalpie**  $\Delta_f H(s)$  von Eis (festem Wasser) bei 0.00 °C und 100 kPa.
- c) Berechnen Sie die **Entropie**  $S(l)$  von flüssigem Wasser bei 0.00 °C und 100 kPa.
- d) Berechnen Sie die **Erstarrungs-Entropie**  $\Delta_{solidification} S$  von Wasser bei 0.00 °C und 100 kPa.
- e) Welche **isobare Gesamt-Wärme**  $q_{p, total}$  ist an dem oben genannten Prozess beteiligt?  
(negatives Vorzeichen: Wasser hat Wärme abgegeben;  
positives Vorzeichen: Wasser hat Wärme aufgenommen)
- f) Welche **Druck-Volumenarbeit**  $w_{pV, total}$  ist an dem oben genannten Prozess beteiligt?  
(negatives Vorzeichen: Wasser hat Arbeit abgegeben;  
positives Vorzeichen: Wasser hat Arbeit aufgenommen)

|                                        |
|----------------------------------------|
| $\Delta_f H(l)$ bei 0°C                |
| $\Delta_f H(s)$ bei 0°C                |
| $S(l)$ bei 0°C                         |
| $\Delta_{solidification} S(0^\circ C)$ |
| $q_{p, total}$                         |
| $w_{pV, total}$                        |

6 Punkte, davon erreicht:



## Thermodynamische Daten und Konstanten, Umrechnungsfaktoren

Wasserstoff ( $H_2$ ): VAN-DER-WAALS-Daten

Wärmekapazität

Adiabatenkoeffizient

|                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                                 |                 |                                                                |     |     |            |            |          |                            |                           |   |   |             |                |   |                |                                                                |                                       |  |  |  |  |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-----------------|----------------------------------------------------------------|-----|-----|------------|------------|----------|----------------------------|---------------------------|---|---|-------------|----------------|---|----------------|----------------------------------------------------------------|---------------------------------------|--|--|--|--|
| $a = 2.46 \cdot 10^{-2} \frac{\text{Pa} \cdot \text{m}^6}{\text{mol}^2}$                                    | $b = 2.67 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}^3}{\text{mol}}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | $\overline{C_p} = 28.9 \frac{J}{K \text{ mol}}$ | $\kappa = 1.41$ |                                                                |     |     |            |            |          |                            |                           |   |   |             |                |   |                |                                                                |                                       |  |  |  |  |
| $\mu_{J-T} = \left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_H \approx \frac{\frac{2a}{RT} - b}{\overline{C_p}}$ | <table><tr><td>Prozess</td><td><math>w</math></td><td><math>q</math></td><td><math>\Delta U</math></td><td><math>\Delta T</math></td></tr><tr><td>Isotherm</td><td><math>-nRT \ln \frac{V_f}{V_i}</math></td><td><math>nRT \ln \frac{V_f}{V_i}</math></td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>Adiabatisch</td><td><math>C_V \Delta T</math></td><td>0</td><td><math>C_V \Delta T</math></td><td><math>\left(\left(\frac{V_i}{V_f}\right)^{\kappa-1} - 1\right) T_i</math></td></tr><tr><td colspan="5">Reversible Volumenarbeit idealer Gase</td></tr></table> |                                                 |                 | Prozess                                                        | $w$ | $q$ | $\Delta U$ | $\Delta T$ | Isotherm | $-nRT \ln \frac{V_f}{V_i}$ | $nRT \ln \frac{V_f}{V_i}$ | 0 | 0 | Adiabatisch | $C_V \Delta T$ | 0 | $C_V \Delta T$ | $\left(\left(\frac{V_i}{V_f}\right)^{\kappa-1} - 1\right) T_i$ | Reversible Volumenarbeit idealer Gase |  |  |  |  |
| Prozess                                                                                                     | $w$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | $q$                                             | $\Delta U$      | $\Delta T$                                                     |     |     |            |            |          |                            |                           |   |   |             |                |   |                |                                                                |                                       |  |  |  |  |
| Isotherm                                                                                                    | $-nRT \ln \frac{V_f}{V_i}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | $nRT \ln \frac{V_f}{V_i}$                       | 0               | 0                                                              |     |     |            |            |          |                            |                           |   |   |             |                |   |                |                                                                |                                       |  |  |  |  |
| Adiabatisch                                                                                                 | $C_V \Delta T$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 0                                               | $C_V \Delta T$  | $\left(\left(\frac{V_i}{V_f}\right)^{\kappa-1} - 1\right) T_i$ |     |     |            |            |          |                            |                           |   |   |             |                |   |                |                                                                |                                       |  |  |  |  |
| Reversible Volumenarbeit idealer Gase                                                                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                                 |                 |                                                                |     |     |            |            |          |                            |                           |   |   |             |                |   |                |                                                                |                                       |  |  |  |  |

|                             |                                                        |
|-----------------------------|--------------------------------------------------------|
| Gaskonstante                | $R = 8.314 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$ |
| <b>BOLTZMANN</b> -Konstante | $k_B = 1.381 \cdot 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}}$ |
| <b>AVOGADRO</b> -Konstante  | $N_A = 6.022 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{mol}}$       |

|                   | molare Standardbildungsenthalpie                          | molare Standardentropie                          |
|-------------------|-----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| $C (g)$           | $\Delta_f H^\circ = 716.68 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$  | $S^\circ = 158.1 \frac{\text{J}}{\text{mol K}}$  |
| $H (g)$           | $\Delta_f H^\circ = 217.94 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$  | $S^\circ = 114.7 \frac{\text{J}}{\text{mol K}}$  |
| $C_6H_6 (g)$      | $\Delta_f H^\circ = 82.9 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$    | $S^\circ = 269.3 \frac{\text{J}}{\text{mol K}}$  |
| $CH_3CH_2OH (g)$  | $\Delta_f H^\circ = -235.1 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$  | $S^\circ = 282.7 \frac{\text{J}}{\text{mol K}}$  |
| $CH_2 = CH_2 (g)$ | $\Delta_f H^\circ = 52.3 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$    | $S^\circ = 219.6 \frac{\text{J}}{\text{mol K}}$  |
| $H_2O (g)$        | $\Delta_f H^\circ = -241.83 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$ | $S^\circ = 188.72 \frac{\text{J}}{\text{mol K}}$ |

|            |                                         |                                                        |
|------------|-----------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| Temperatur | $0.00^\circ\text{C} = 273.15 \text{ K}$ |                                                        |
| Druck      | $1.00 \text{ bar} = 100 \text{ kPa}$    | $1 \text{ atm} = 101325 \text{ Pa} = 760 \text{ Torr}$ |

Molare Schmelzenthalpie und Verdampfungsenthalpie von Wasser bei 100 kPa

$$\Delta_{fus} H (0.00^\circ\text{C}) = 6.00 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} \quad \Delta_{vap} H (100^\circ\text{C}) = 40.6 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$$

Wärmekapazität von flüssigem und gasförmigem Wasser bei 100 kPa zwischen  $0^\circ\text{C}$  und  $100^\circ\text{C}$ :

$$C_p(l) = 75.5 \frac{\text{J}}{\text{mol K}} \quad : \quad C_p(g) = 33.7 \frac{\text{J}}{\text{mol K}}$$

Dichte von Wasser und Eis bei 100 kPa:

$$\rho(25^\circ\text{C}), (l) = 997 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \rho(0^\circ\text{C}), (s) = 918 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$