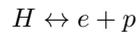


Ihre Lösung ist bis zum 09.12.2015 um 12 Uhr in das Postfach von Prof. Dr. Heiko Rieger im Erdgeschoss von Gebäude E2 6 einzuwerfen.

1. [3 Punkte] Saha-Ionisierungsgesetz

Wir betrachten die Dissoziation von elementarem Wasserstoff in freie Elektronen und Protonen



bei Temperaturen $T \ll 10^5 K$ (Grundzustandsenergie von H : $E_0 = -13,6 eV$, $|E_0| \hat{=} 1,59 \cdot 10^5 K$). Zeigen Sie das Saha-Ionisierungsgesetz für Wasserstoff:

$$\frac{n_e \cdot n_p}{n_H} = \frac{1}{\lambda^3} \cdot \exp\left(-\frac{|E_0|}{k_B T}\right) \quad \text{mit } \lambda = \sqrt{\frac{h^2}{2\pi m_e k_B T}}$$

bzw. für $n_e = n_p$:

$$n_e = \frac{\sqrt{n_H}}{\lambda^{\frac{3}{2}}} \cdot \exp\left(-\frac{|E_0|}{2k_B T}\right) .$$

Dabei bezeichnet n_e die Teilchenzahldichte freier Elektronen, n_p die Teilchenzahldichte freier Protonen und n_H die Teilchenzahldichte von undissoziiertem Wasserstoff.

Diskutieren Sie die Fälle $T \rightarrow 0$ und $T \rightarrow \infty$. Gehen Sie dabei auf die Entropie ein.

Hinweis: Gehen Sie von der Boltzmann-Statistik aus.

2. [4 Punkte] Virialkoeffizienten

Bestimmen Sie den zweiten Virialkoeffizienten $b(T)$ sowie die resultierenden Konstanten in der van-der-Waals-Gleichung für:

- 1.5 (a) harte Kugeln mit Radius σ ,
- 1.5 (b) harte Kugeln mit Radius σ mit einem zusätzlichen attraktiven Bereich $v(r) = -u_0$ für $2\sigma < r < r_0$.
- 1 (c) Diskutieren Sie das Vorzeichen von $b(T)$ als Funktion von T für die Aufgabenteile (a) und (b) und interpretieren Sie das Resultat. Betrachten Sie dazu die Grenzfälle $T \rightarrow 0$ und $T \rightarrow \infty$.

3. [7 Punkte] Kritischer Punkt des van-der-Waals-Gases

- 2 (a) Berechnen Sie den kritischen Druck p_c , die kritische Temperatur T_c sowie das kritische molare Volumen v_c für ein van-der-Waals-Gas.
- 1 (b) Definieren Sie $\tilde{p} = \frac{p}{p_c}$, $\tilde{T} = \frac{T}{T_c}$ und $\tilde{v} = \frac{v}{v_c}$ und leiten Sie damit die dimensionslose (universelle) Form der van-der-Waals-Gleichung her.
- 4 (c) Wir führen nun eine Entwicklung um den kritischen Punkt durch. Berechnen Sie $f(v)$ durch Integration von $p(v)$ bei konstanter Temperatur T und bestimmen Sie die temperaturabhängige Integrationskonstante $c(T)$ durch Vergleich mit dem idealem Gas. Berechnen Sie $\mu(v)$ bzw. $\mu(n)$ ($n = \frac{1}{v}$). Skizzieren Sie $\Delta n = n - n_c$ als Funktion von $\Delta\mu = \mu - \mu_c$. Entwickeln Sie $\Delta\mu$ in Δn für $\tau = \frac{T - T_c}{T_c} \ll 1$. Zeigen Sie $\Delta n(\tau) \propto \sqrt{|\tau|}$ für $\Delta\mu = 0$, $\tau < 0$ und $|\tau| \ll 1$.

4. [3 Punkte] Maxwellische Geschwindigkeitsverteilung

Wir betrachten ein beliebiges Gas aus wechselwirkenden Teilchen im kanonischen Ensemble.

- 1.5 (a) Leiten Sie Ausdrücke für die Impulsverteilung $P_p(\mathbf{p})$ und die Geschwindigkeitsverteilung $P_v(\mathbf{v})$ her.
- 0.5 (b) Leiten Sie die Maxwellische Geschwindigkeitsverteilung $P(v)$ her ($v = |\mathbf{v}|$).
- 1 (c) Berechnen Sie die wahrscheinlichste Geschwindigkeit \tilde{v} , die mittlere Geschwindigkeit \bar{v} und die Wurzel aus dem mittleren Geschwindigkeitsquadrat v_{rms} für die Maxwellische Geschwindigkeitsverteilung.

5. [3 Punkte] Druck durch Impulsübertrag

Zeigen Sie für ein ideales Gas in einem würfelförmigen Volumen V mit Kantenlänge L , dass der Druck durch $p = nm\overline{v_x^2} = \frac{1}{3}nm\overline{v^2}$ mit $n = \frac{N}{V}$ gegeben ist und leiten Sie ausgehend hiervon mithilfe der Maxwellschen Geschwindigkeitsverteilung die ideale Gasgleichung her.

6. [2 Punkte] Ammoniak

Der Dampfdruck p von festem Ammoniak ist gegeben durch $\ln(p) = 23,03 - \frac{3754}{T}$ und der von flüssigem Ammoniak durch $\ln(p) = 19,49 - \frac{3063}{T}$.

1

(a) Bei welcher Temperatur liegt der Tripelpunkt von Ammoniak?

1

(b) Berechnen Sie am Tripelpunkt die latente Wärme für

- i. Sublimation,
- ii. Verdampfen,
- iii. Schmelzen.