

# Nachholklausur Thermodynamik/Elektrodynamik E2/E2p, SoSe 2023 Braun

**Vorname:**

**Name:**

**Mat#:**

- E2  
 E2p (bitte ankreuzen)

Die mit Stern (\*) gekennzeichneten Aufgaben sind für E2-Kandidaten vorgesehen. E2p-Kandidaten dürfen diese Aufgabe auch lösen. Hilfsmittel: Taschenrechner. Maximale Punktzahl: 60 (45 für E2p). Note 1.0 für etwa 2/3 der Punkte, bestanden ab etwa 1/3 der Punktzahl. Bearbeitungszeit: 1.5 Stunden.

*Wenn etwas unklar ist, fragen Sie die Tutoren, nicht den Nachbarn :-)*

1	2	3	4	5	6	7*	8*	9	10	11	12	13	14	15*	16*	Summe	Note
2	3	6	4	2	6	2*	5*	3	4	7	3	2	3	3*	5*	45/60*	

## Formelsammlung Thermodynamik

### Thermodynamische Potentiale

$$dU = TdS - pdV + \mu dN$$

**Enthalpie**  $H = U + pV$

**Freie Energie**  $F = U - TS$

**Freie Enthalpie**  $G = U + pV - TS$

### Hauptsätze

1.  $dU = \delta Q + \delta W$

2.  $dS = \delta Q_{rev}/T$

**Gleichverteilungssatz**  $\bar{E} = \frac{f}{2}kT$

**Gasgesetz**  $pV = NkT$

### a-Prozesse:

**Isotherme:**  $\Delta U = 0$

**Isochore:**  $\Delta W = 0$

**Isobare:**  $\Delta W = -p(V_2 - V_1)$

**Adiabate:**  $\Delta Q = 0$

$pV^\gamma = \text{const} \quad \gamma = C_p/C_v$

### Entropie eines idealen Gases

$$S(U, V, N) = k \ln \Omega$$

$$= Nk[\ln(VU^{3/2}N^{-5/2}) + \text{const}1]$$

### Konstanten

Boltzmann Konstante  $k = 1.38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}}$

Avogadro-Zahl  $N_A = 6 \cdot 10^{23} \frac{\text{Teilchen}}{\text{mol}}$

Gaskonstante  $R = 8.32 \frac{\text{J}}{\text{molK}}$

### Umrechnungen

$1 \text{ bar} = 10^5 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \quad 1 \text{ cal} = 4.186 \text{ J}$

**Carnot-Wirkungsgrad**  $\eta = \frac{\Delta T}{T}$

### Chemisches Potential von idealen Mischungen

#### Der Lösung:

$$\mu_0^{\text{Misch}} = \mu_0^{(0)} - kT N_1/N_0$$

#### Der gelösten Moleküle:

$$\mu_1^{\text{Misch}} = \mu_1^{(0)} + kT \ln(N_1/N_0)$$

### Boltzmann-Verteilung

$$P(s) \sim e^{-\frac{E(s)}{kT}}$$

### Gaskinetische Zusammenhänge

Mittlere freie Weglänge  $\lambda = (\sigma n)^{-1}$

Wirkungsquerschnitt  $\sigma = \pi d^2$

## Formelsammlung Elektrodynamik

### Elektrische Felder

$$\vec{E} = -\text{grad}\varphi \quad \vec{F} = q\vec{E}$$

Sprungbedingung  $\Delta E_{\perp} = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$

Mit Materie:  $\epsilon_1 E_{1\perp} - \epsilon_2 E_{2\perp} = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$

Coulomb  $|\vec{E}| = \frac{1}{4\pi\epsilon_0 r^2} q$

Plattenkond. (Vakuum)  $E = \frac{Q}{\epsilon_0 A} \quad C = \frac{\epsilon_0 A}{d}$

Dipol  $\vec{p} = q\vec{d} \quad W = -\vec{p}\vec{E}$   
Drehmoment  $\vec{M} = \vec{p} \times \vec{E}$

### Magnetfelder

$$\vec{B} = \text{rot}\vec{A} \quad \frac{\vec{F}}{L} = \vec{I} \times \vec{B} \quad \vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$$

Sprungbedingung  $\Delta B_{\parallel} = \mu_0 \frac{N}{L} I$

Mit Materie:  $\frac{B_{1\parallel}}{\mu_1} - \frac{B_{2\parallel}}{\mu_2} = \mu_0 \frac{N}{L} I$

Biot-Savart  $\vec{dB} = \frac{\mu_0 I d\vec{l} \times \vec{r}}{4\pi r^3}$

Ampère-Gesetz  $\vec{B} = \frac{\mu_0 \vec{I} \times \vec{r}}{2\pi r^2}$

Lange Spule (Vakuum)  $B = \mu_0 \frac{N}{l} I \quad L = \mu_0 \frac{N^2}{l} A$

Dipol  $\vec{m} = I\vec{A} \quad W = -\vec{m}\vec{B}$   
Drehmoment  $\vec{M} = \vec{m} \times \vec{B}$

Kondensator	U = Q/C	Z = (iwC) <sup>-1</sup>	Energie: W = CU <sup>2</sup> /2	Kirchhoff
Widerstand	U = RI	Z = R	Energie: W = UQ	$\sum I = 0$ an Knoten
Induktivität	U = -Lİ	Z = iwL	Energie: W = LI <sup>2</sup> /2	$\sum U = 0$ in Masche

### Maxwell-Gesetze

1. $\text{div}\vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$	$\oiint \vec{E} d\vec{A} = \iiint \frac{\rho}{\epsilon_0} dV$	Linke Seite in Materie: $\oiint (\vec{E} + \vec{P}/\epsilon_0) d\vec{A} \quad \vec{P} = \frac{N}{V} \vec{p}$
2. $\text{div}\vec{B} = 0$	$\oiint \vec{B} d\vec{A} = 0$	
3. $\text{rot}\vec{E} = -\dot{\vec{B}}$	$\oint \vec{E} ds = -\iint \dot{\vec{B}} d\vec{A}$ (ruhender Leiter)	$U = -\frac{d}{dt} \iint \vec{B} d\vec{A}$ (Induktionsgesetz)
4. $\text{rot}\vec{B} = \mu_0(\vec{j} + \epsilon_0 \dot{\vec{E}})$	$\oint \vec{B} ds = \mu_0 I$ $\oiint \vec{B} ds = \iint \mu_0(\vec{j} + \epsilon_0 \dot{\vec{E}}) d\vec{A}$	Linke Seite in Materie: $\oint (\vec{B} - \mu_0 \vec{M}) ds \quad \vec{M} = \frac{N}{V} \vec{m}$

Energiedichte  $\frac{W}{V} = \frac{\epsilon_0 E^2}{2} + \frac{B^2}{2\mu_0}$       Poynting  $\vec{S} = \frac{\vec{E} \times \vec{B}}{\mu_0}$

Elektrische Feldkonstante  $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \frac{As}{Vm}$

Magnetische Feldkonstante  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{Vs}{Am}$

Planck'sches Wirkungsquantum  $h = 6.63 \cdot 10^{-34} \frac{kgm^2}{s}$

Elementarladung  $e_0 = 1.6 \cdot 10^{-19} C$

Elektronenmasse  $m_e = 9.11 \cdot 10^{-31} kg$

## *Thermodynamik*

### **1. Carnot-Maschine**

Eine Carnot-Maschine arbeitet zwischen zwei Wärmebädern der Temperatur  $550^{\circ}\text{C}$  und  $30^{\circ}\text{C}$ .

- a) Wenn die Maschine  $1.5\text{kJ}$  an mechanischer Energie erzeugt, wieviel Wärme erhält sie vom heißeren Bad und wieviel gibt sie an das kältere Bad ab? **1 Punkt**
- b) Nimmt die Maschine mehr Entropie vom wärmeren Bad auf, als sie an das kältere Bad abgibt? **1 Punkt**

### **2. Milchkaffee**

Für die Zubereitung von Milchkaffee sollen  $m_M = 80\text{g}$  kalte Milch durch Einleitung von  $T_D=130^{\circ}\text{C}$  heißem Wasserdampf von  $T_K=5^{\circ}\text{C}$  auf  $T_H=60^{\circ}\text{C}$  erhitzt werden. Wieviel Wasserdampf (Masse) wird dazu benötigt? (spezifische Wärmekapazitäten: Wasserdampf  $c_D=1.850\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ , Wasser  $c_W=4.2\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ , Milch  $c_M=3.85\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ; Verdampfungswärme von Wasser  $q=2255\text{ kJ/kg}$ )

**3 Punkte**

### 3. Wetterballon.

Ein Wetterballon hätte prall gefüllt das Volumen  $V_{\max}=20\text{m}^3$ . Am Erdboden ist er zunächst nur teilweise gefüllt worden, beim Druck  $p_1=1\text{bar}$  und der Temperatur  $T_1=23^\circ\text{C}$  nimmt das eingefüllte Helium (atomares Gas, Atommasse  $4\text{ g/mol}$ ) nur das Volumen  $V_1=5\text{m}^3$  ein.

- a) Welche Stoffmenge  $\nu$  und welche Masse  $m$  an Helium enthält der Ballon? **1 Punkt**
- b) Der Aufstieg geschieht so rasch, dass durch die Ballonhülle keine Wärme übertragen wird. In einer bestimmten Höhe ist der Innendruck gleich dem Außendruck von  $p_2=0.2\text{bar}$ . Welches Gasvolumen  $V_2$  enthält dann der Ballon? Wie hat sich die innere Energie geändert? (Hinweis: Das lässt sich auch berechnen, ohne die Temperatur zu kennen!) Welche Arbeit wurde bei der Ausdehnung verrichtet? **3 Punkte**
- c) Sonneneinstrahlung heizt den Ballon danach auf und das Helium dehnt sich aus, bis der Ballon prall gefüllt ist. ( $V_3=V_{\max}$ ,  $p_3=p_2$ ). Welche Temperatur  $T_3$  hat das Helium dann? (Hinweis: Lässt sich ohne die Lösung von Teil b berechnen!) **2 Punkte**

#### 4. Entropie

- a) Ein Prozess führt vom Zustand A zum Zustand B. Er wird einmal reversibel ( $dS = \delta Q_{\text{rev}}/T$ ) und einmal irreversibel geführt ( $dS \geq \delta Q/T$ ). Bedeutet dies nun, daß im irreversiblen Fall  $dS$  größer geworden ist, oder  $\delta Q$  kleiner? Warum? **2 Punkte**
- b) Wie groß ist die Entropieproduktion, wenn 100 kg Eis bei 0 °C vorliegen und auf 60 °C erwärmt werden? (Schmelzwärme  $L_{\text{Eis}}=334 \text{ kJ/kg}$ ;  $c_{\text{Wasser}}=4.2\text{kJ}/(\text{K}\cdot\text{kg})$ ) **2 Punkte**

#### 5. Maß der Entropie.

Welche der folgenden Funktionen eignen sich als Maß der Entropie eines physikalischen Systems?  
Bitte begründen Sie!

- a)  $S = (NU/V)^{2/3}$   
b)  $S = N \log(UV/N^2)$

**2 Punkte**

### 6. Ein theoretischer Kreisprozess

Ein Mol eines idealen Gases mit  $C_V = 3R/2$  durchlaufe folgenden reversiblen Kreisprozess. Anfangsdruck und -volumen sind 1 bar und 10 l. Im ersten Schritt wird das Gas bei festem Volumen so lange erhitzt, bis sich der Druck verdoppelt hat. Dann wird der Druck festgehalten und das Volumen verdoppelt. Beidesmal nimmt das Gas Wärme auf. Im dritten Schritt wird das Gas so lange abgekühlt, bis der Druck wieder auf 1 bar gesunken ist und dann wird bei festem Druck das Gas komprimiert, bis ein Volumen von 10 l erreicht wird. Dabei gibt das Gas Wärme ab.

- a) Zeichnen Sie das p-V-Diagramm des Kreisprozesses und benennen Sie die Prozesse. **2 Punkte**
- b) Geben Sie für jeden Schritt und insgesamt die zugeführte Wärme, die verrichtete Arbeit und die Änderung der inneren Energie an. **3 Punkte**
- c) Wie groß ist der Wirkungsgrad dieses Kreisprozesses? **1 Punkt**

### 7. Kinetische Gastheorie (\*)

Nehmen Sie ein ideales Gas der Temperatur 20°C, einem Druck von 1 bar, einem Moleküldurchmesser von  $d=0.2\text{nm}$  und einer Molmasse von 2g/mol (Wasserstoff  $\text{H}_2$ )

a) Berechnen Sie die mittlere freie Weglänge

**1 Punkt**

b) Mit welcher Frequenz treffen sich die Moleküle im Mittel? ( $\bar{v}^2 \cong \overline{v^2}$ )

**1 Punkt**

### 8. Dampfdruckerniedrigung (\*)

a) Beim Dampfdruck ist eine Flüssigkeit im Gleichgewicht mit seinem Dampf. Nun werden in der Flüssigkeit Teilchen gelöst. Begründen Sie anschaulich, warum sich der Dampfdruck erniedrigt.

**1 Punkt**

b) Für das chemische Potential der Lösung hatten wir hergeleitet  $\mu_0^{\text{Misch}} = \mu_0 - kT(N_1/N_0)$  mit  $N_0$  der Zahl der Flüssigkeitsteilchen und  $N_1$  der gelösten Teilchen. Für die gelösten Teilchen gilt  $\mu_1^{\text{Misch}} = \mu_1 + kT \ln N_1/N_0$ . Welche chemischen Potentiale stehen bei der in (a) beschriebenen Situation im Gleichgewicht?

**1 Punkt**

c) Halten Sie nun die Temperatur  $T$  konstant und entwickeln Sie die Gleichgewichtsrelation linear um den Gleichgewichtsdruck  $p$ . Leiten Sie mit den Relationen  $G = \mu N$ ,  $dG = SdT + Vdp + \mu dN$ ,  $pV = NkT$  und einer Näherung eine Relation zwischen der Änderung des Dampfdrucks und der Zahl der gelösten Partikel  $N_1$  her.

**3 Punkte**





## *Elektrodynamik*

### **9. Magnetfeld einer ebenen Welle**

Eine transversale, linear polarisierte, elektromagnetische Welle breitet sich in z-Richtung in einem ungeladenen, nicht-leitenden Medium aus. Die Feldstärke sei  $E(z,t) = E_0 \cos(kz - \omega t)$ . Berechnen Sie die das magnetische Feld  $B(x,y,z,t)$  mittels den Maxwell-Gesetzen. **3 Punkte**

### **10. Kugelkondensator**

Bestimmen Sie die gespeicherte Energie in einem elektrostatischen Feld, das zwischen zwei mit Luft gefüllten konzentrischen Metallkugeln mit Ladungen  $q$  und  $-q$  und den Radien  $R$  und  $2R$  herrscht. **4 Punkte**

### **11. Elektrische Felder**

- a) Erklären Sie anschaulich in Worten die 1. Maxwell'sche Gleichung in Integralform. **2 Punkte**
- b) Welche Mechanismen sorgen dafür, daß im Inneren eines elektrischen Leiters  $Q = 0$  ist? **2 Punkte**
- c) Bestimmen Sie die gespeicherte Energie in einem elektrostatischen Feld, das zwischen zwei mit Luft gefüllten konzentrischen Röhren der Radien  $R$  und  $2R$  und der Länge  $L$  herrscht, wenn beide mit Ladungen  $q$  und  $-q$  beaufschlagt sind. Vernachlässigen Sie Randeffekte. **3 Punkte**

**12. Millikan-Versuch**

a) Beschreiben Sie, wie Robert Millikan mit Öltröpfen die Elementarladung gemessen hat. **3 Punkte**

**13. Erdmagnetfeld**

Eine Spule mit 2000 Windungen, deren Fläche ( $200\text{cm}^2$ ) senkrecht zum Erdmagnetfeld steht, wird in einer Sekunde um  $90^\circ$  gedreht. Die Feldstärke des Erdmagnetfelds in Mitteleuropa beträgt  $48\ \mu\text{T}$ . Wie hoch ist die maximale erzeugte Elektromotorische Kraft in der Spule? **2 Punkte**

**14. Entropieänderung ohmscher Verluste**

Durch einen 100 Ohm-Widerstand wird bei  $T=300\text{K}$  für eine Minute ein Strom von 1 Ampere geschickt. Wie groß ist die Entropieänderung bei reversibler Prozessführung im Widerstand und in seiner Umgebung? Veränderungen in der Stromquelle werden nicht berücksichtigt. **3 Punkte**

**15. Optimaler Innenwiderstand (\*)**

An eine Batterie wird ein Lastwiderstand  $R_A$  angelegt. Zeigen Sie, daß die Leistung, die in  $R_A$  abgegeben wird, dann maximal ist, wenn  $R_A$  gleich dem Innenwiderstand  $R_I$  der Batterie ist. Der Innenwiderstand wird seriell zu einer idealisierten widerstandslosen Spannungsquelle angenommen. **3 Punkte**

**16. Sprungbedingungen für  $E$  und  $B$  (\*)**

- a) Berechnen Sie die Sprungbedingungen für Tangential- und Normalkomponenten des elektrischen Felds  $E$  an der Grenzfläche zwischen zwei Dielektrika mit relativen Dielektrizitätskonstanten  $\epsilon_1$  und  $\epsilon_2$  an (ohne freie Oberflächenladungen). **3 Punkte**
- b) Wie verhalten sich im Vergleich die magnetischen Felder an einer Grenzfläche zwischen unterschiedlichen  $\mu_1$  und  $\mu_2$  (ohne Oberflächenströme)? Berechnen Sie die Sprungbedingungen. **2 Punkte**