Klausur zur Klassischen Experimentalphysik III (Optik + Thermodynamik) am 15.04.2015

Name, Vorname:	Matrikelnummer:		
Studiengang:	Wiederholungsprüfung?	Nein ☐	Ja ☐

Aufgabe	1	2	3	4	5	6	Σ	Note
Max. Punkte	5	5	6	7	5	6	34	
Erreichte Punkte								

Bitte jedes Blatt mit Namen versehen, jede Aufgabe ordentlich kennzeichnen und leserlich schreiben!

Aufgabe 1: (1,5 +1,5 + 2 = 5 Punkte)

Ein Strahl unpolarisiertes Licht der Wellenlänge λ = 589 nm fällt senkrecht auf ein Kalkspat-Plättchen, dessen optische Achse parallel zur Oberfläche liegt. Die daraus resultierende Lichtgeschwindigkeit des senkrecht zur optischen Achse polarisierten Strahls (ordentlicher Strahl) ist $v_o = 1{,}81 \cdot 10^8$ m/s, die des parallel zur optischen Achse polarisierten Strahls (außerordentlicher Strahl) ist $v_{ao} = 2{,}02 \cdot 10^8$ m/s (Lichtgeschwindigkeit: $c = 3 \cdot 10^8$ m/s).

a) Berechnen Sie die Brechungsindizes n_o des ordentlichen und n_{ao} des außerordentlichen Strahls.

b) Welche minimale Dicke müssen Sie wählen, um ein λ/2-Plättchen zu erhalten?

c) Erklären Sie, wie eine Anordnung aussehen muss, um zirkular polarisiertes Licht aus einem unpolarisierten Strahl zu erzeugen.

Aufgabe 2: (1,5 + 1,5 + 2 = 5 Punkte)

a) Um wie viel geringer als die wahre Tiefe (h = 3,20 m) scheint die Tiefe h' eines großen Wasserbeckens zu sein, wenn man senkrecht von oben in das Wasser schaut (n_W = 1,33). Berechnen Sie die Höhendifferenz Δh.

Ein Taucher befindet sind in einer Tiefe von h = 3,20 m unter der Wasseroberfläche und schaut nach oben.

b) Unter welchem Winkel φ_S gegen das Lot auf die Wasseroberfläche sieht der Taucher die Sonne, wenn ein Beobachter außerhalb des Wassers sie unter 45° sieht? Unter welchem Winkel φ_{max} würde der Taucher die Sonne am Abend untergehen sehen?

c) Was sieht der Taucher in Abhängigkeit der Blickrichtung, wenn er (bei Tageslicht) von unten gegen die Wasseroberfläche schaut? Sieht er „überall" die Außenwelt? Ein Bereich, den er sieht, ist geometrisch klar definiert. Berechnen Sie diesen.

Brechungsindex von Wasser: n_W = 1,33

Aufgabe 3: (1 + 3 + 2 = 6 Punkte)

Licht trifft auf ein ruhendes, freies Elektron. Das Licht wird um 180° gestreut und besitzt nach der Streuung eine andere Wellenlänge.

a) Wie nennt man diesen Effekt und was lernt man daraus?

b) Berechnen Sie den Impuls p_2 und die kinetische Energie W_2 des Elektrons nach dem Stoß. Die Wellenlänge des einfallenden Lichts beträgt λ_1 = 0,3 nm.

c) Wie groß ist die Wellenlänge λ_2 des Lichts und die des Elektrons λ_e nach der Streuung? Wie nennt man λ_e?

Hinweis: Benutzen Sie für ihre Berechnung Energie- und Impulserhaltung. Rechnen Sie nicht relativistisch; $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C, $m_e = 9{,}1 \cdot 10^{-31}$ kg, $h = 6{,}6262 \cdot 10^{-34}$ Js.

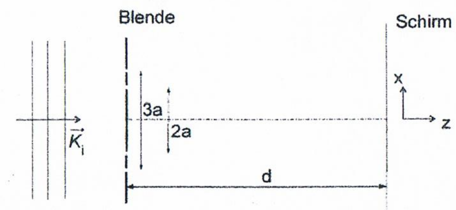
Aufgabe 4: (2,5 + 2,5 + 2 = 7 Punkte)

Eine metallische Blende wird durch eine von links einfallende ebene Welle mit Wellenvektor $\vec{k}_i$ senkrecht beleuchtet. Die beiden inneren Spalte haben den Abstand $2a$ und die beiden äußeren Spalte haben den Abstand $3a$ voneinander.

a) Berechnen Sie für die gezeigte Spalt-Anordnung die Beugungsintensität I/I_0 als Funktion von $k_x \cdot a$ in Fraunhofer-Näherung.
Die Transmissionsfunktionen der einzelnen Spalte können durch Deltafunktionen approximiert werden. k_x ist die x-Komponente des Wellenvektors der gebeugten Welle.

b) Skizzieren Sie das Beugungsbild als Funktion von $k_x \cdot a$ im Intervall [-4π …$+4\pi$].

c) Wie ändert sich das Beugungsmuster, wenn die Phase des Lichts der beiden äußeren Spalte durch Phasenplatten um 180° verzögert wird?



Nützliche Relationen:

$$\cos x - \cos y = -2 \cdot \sin\frac{x+y}{2} \cdot \sin\frac{x-y}{2} \quad \text{bzw.}$$

$$\cos x + \cos y = 2 \cdot \cos\frac{x+y}{2} \cdot \cos\frac{x-y}{2}$$

Aufgabe 5: (5 Punkte)

Skizzieren Sie die Isothermen eines realen Gases in einem *p-V*-Diagramm für verschiedene Temperaturen.

Wo liegt die flüssige und wo die gasförmige Phase? Erläutern Sie, was die kritische Temperatur bzw. der kritische Punkt ist.

Aufgabe 6: (1,5 + 1 + 1 + 1 + 1,5 = 6 Punkte)

Eine abgeschlossene Gasmenge ist im Anfangszustand durch folgende Größen gekennzeichnet: $V_1 = 150\ \text{cm}^2$, $p_1 = 232\ \text{kPa}$, $T_1 = 247\ \text{K}$.
Bei diesem Kreisprozess werden von dem Gas nacheinander folgende Zustandsänderungen durchlaufen:
(1 $\rightarrow$ 2) Isochore Erwärmung um 40 K,
(2 $\rightarrow$ 3) Isotherme Expansion auf $290\ \text{cm}^3$,
(3 $\rightarrow$ 4) Isochore Abkühlung auf die Anfangstemperatur,
(4 $\rightarrow$ 1) Isotherme Kompression auf den Anfangszustand.

a) Ermitteln Sie Druck, Volumen und Temperatur nach jeder Zustandsänderung.
b) Zeichnen Sie das *p-V*-Diagramm für diesen Kreisprozess. Wie nennt man einen solchen Kreisprozess?
c) Entscheiden Sie, ob nach Abschluss des Kreisprozesses das System insgesamt Arbeit abgegeben oder aufgenommen hat. Begründen Sie Ihre Antwort ohne Rechnung.
d) Bestimmen Sie nun diese Arbeit.
e) Wie groß ist der thermische Wirkungsgrad dieses Prozesses? Geben Sie eine Möglichkeit an, den Wirkungsgrad zu vergrößern.

Aufgabe 1

a) $v_o = \frac{c}{n_o} \Rightarrow n_o = \frac{c}{v_o} = 1{,}66$

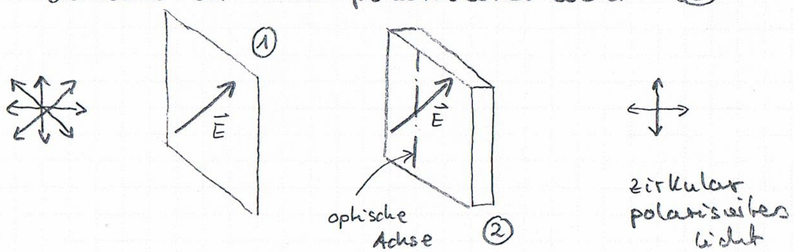
$n_{ao} = \frac{c}{v_{ao}} = 1{,}49$

b) Phasenunterschied $\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda}\Delta s$

mit $\Delta s = d\,(|n_o - n_{ao}|)$ und $\Delta\phi \mathrel{\hat=} 180° \mathrel{\hat=} \pi \mathrel{\hat=} \frac{\lambda}{2}$

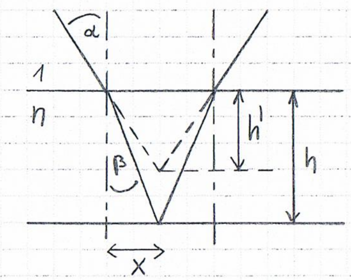
$\Rightarrow d = \frac{\lambda}{2(n_o - n_{ao})} = 1{,}73\,\mu m$

c) ein Polarisator macht aus unpolarisiertem Licht linear polarisiertes Licht ①
ein $\frac{\lambda}{4}$-Plättchen mit optischer Achse unter 45° gegen den $\vec{E}$-Vektor des linear polarisierten Lichts macht daraus zirkular polarisiertes Licht ②



Aufgabe 2

a)



$\tan\alpha = \frac{x}{h'}$, $\tan\beta = \frac{x}{h}$ $\Bigg\}$ $h' = h\,\frac{\tan\beta}{\tan\alpha}$

$\sin\alpha = n \sin\beta$

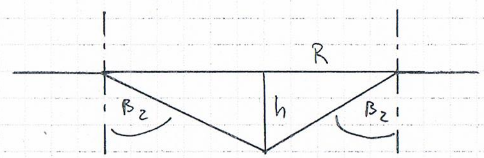
$\alpha \to 0 \Rightarrow \sin \approx \tan$

$\Rightarrow \Delta h = h - h' = \frac{n-1}{n}\, h = 0{,}79\ m$

b) $\beta = \arcsin\left(\frac{\sin\alpha}{n}\right) = 32{,}1°$ $(\alpha_1 = 45°)$

$\beta_2 = 48{,}8°$ $(\alpha_2 = 90°)$ Grenzwinkel der Totalreflektion

c) der Taucher sieht über sich eine kreisrunde Fläche, in der er die "ganze Außenwelt" sieht; außerhalb der Kreisfläche sieht er Reflektionen von Dingen innerhalb des Wassers bzw. Unterseite der Wasseroberfläche wirkt wie ein Spiegel (silbern glänzende Fläche)



$\tan(90° - \beta_2) = \frac{h}{R} \Leftrightarrow R = \frac{h}{\tan(90° - \beta_2)} = 3{,}65\ m$

Aufgabe 3

a) Compton-Effekt : Licht hat auch Teilchencharakter (kann stoßen); Welle-Teilchen-Dualismus

b) $|\vec{p}_{vor}| = |\vec{p}_{nach}| \Leftrightarrow \frac{h}{\lambda_1} = -\frac{h}{\lambda_2} + m_e \vec{v}_e$ (1)

$|\vec{E}_{vor}| = |\vec{E}_{nach}| \Leftrightarrow h\nu_1 = h\nu_2 + \frac{1}{2} m_e \vec{v}_e^{\,2}$ (2)

(1)+(2) mit $\nu = \frac{c}{\lambda}$ $\Rightarrow$ $2\frac{h}{\lambda_1} = \frac{1}{2} m_e \frac{v_e^2}{c} + m_e v_e$

mit $p_e = m_e v_e$ $\Rightarrow$ $p_e^2 + 2 m_e c\, p_e - \frac{4 h m_e c}{\lambda_1} = 0$

$p_e = -m_e c \overset{+}{(-)} \sqrt{m_e^2 c^2 + \frac{4 h m_e c}{\lambda_1}}$

$p_e = 4.38 \cdot 10^{-24} \frac{m\,kg}{s}$

$W_{kin} = \frac{p_e^2}{2 m_e} = 1.055 \cdot 10^{-17}\,J$

c) (2) $\Rightarrow$ $\lambda_2 = h\left(\frac{h}{\lambda_1} - \frac{W_{kin}}{c}\right)^{-1} = 0.305\,nm$

$p_e = \frac{h}{\lambda_e}$ $\Rightarrow$ $\lambda_e = 1.51 \cdot 10^{-10}\,m$

De Broglie Wellenlänge

Aufgabe 4

a) $\frac{I}{I_0} = \left|\int_{-\infty}^{+\infty} T(x)\, e^{i k_x x}\, dx\right|^2$

$T(x) = \delta(x-a) + \delta(x-\frac{3a}{2}) + \delta(x+\frac{3a}{2}) + \delta(x+a)$

$\frac{I}{I_0} = \left|e^{i k_x a} + e^{i k_x \frac{3a}{2}} + e^{-i k_x \frac{3a}{2}} + e^{-i k_x a}\right|^2$

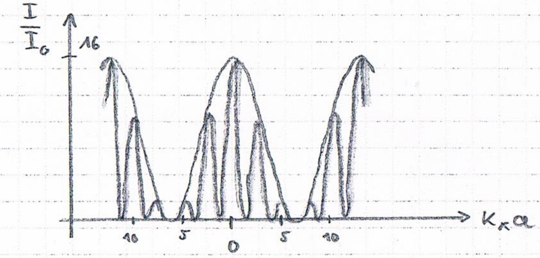
$= \left|2\cos(k_x \frac{3a}{2}) + 2\cos(k_x a)\right|^2$

$= 16 \cos^2(k_x \frac{5a}{4}) \cdot \cos^2(\frac{k_x a}{4})$

b) Nullstellen : $\cos^2(k_x \frac{5a}{4}) \overset{!}{=} 0$

$\Rightarrow k_x a = \frac{2}{5}(2n+1)\pi \approx 1{,}3;\ 3{,}8;\ 6{,}2;\ 8{,}8;\ 11{,}3$

$\cos^2(\frac{k_x a}{4}) \overset{!}{=} 0$ $\Rightarrow$ $k_x a = (2n+1)2\pi \approx 6{,}3;\ 18{,}8$



c) $T_2(x) = \delta(x-a) + \delta(x-3\frac{a}{2})e^{i\pi} + \delta(x+\frac{3a}{2})e^{i\pi} + \delta(x+a)$

$= \delta(x-a) - \delta(x-\frac{3a}{2}) - \delta(x+\frac{3a}{2}) + \delta(x+a)$

$\frac{I}{I_0} = \left|-2\cos(k_x \frac{3a}{2}) + 2\cos(k_x a)\right|^2$

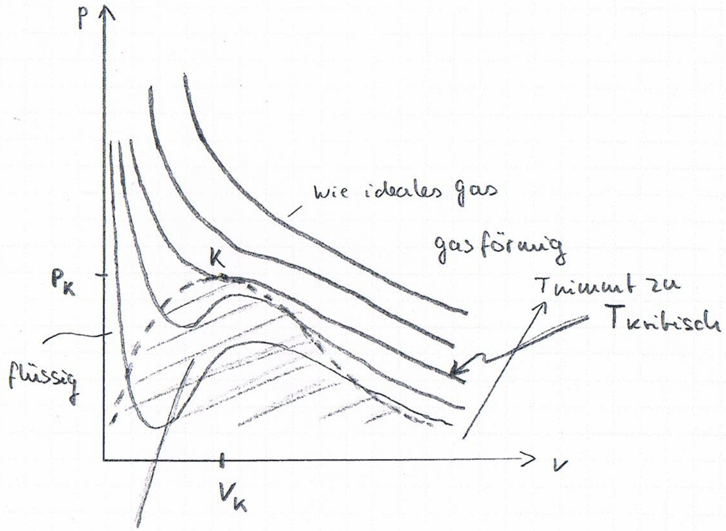
$= 16 \sin^2(k_x \frac{5a}{4}) \cdot \sin^2(k_x \frac{a}{4})$

Nullstellen

$k_x a = \frac{4}{5} n\pi = 0;\ \frac{4}{5}\pi;\ \frac{8}{5}\pi; \ldots$ $\qquad$ $k_x a = 4n\pi = 0;\ 4\pi; \ldots$

$\Rightarrow$ Beugungsmuster um 2π verschoben

Aufgabe 5



koexistenz : gas / Flüssigkeit

die Dampfdruckkurve $p_S(T)$ endet im kritischen Punkt : darüber können die Phasen flüssig / gasförmig nicht mehr unterschieden werden

$K(p_K, T_K)$ entspricht dem Wendepunkt der "kritischen Isotherme" mit T_K im p-V-Diagramm

$K : T_K, p_K, \rho_K$

Aufgabe 6

a) $V_1 = 150\,cm^3 \quad V_2 = 150\,cm^3 \quad V_3 = 290\,cm^3 \quad V_4 = 290\,cm^3$

$p_1 = 232\,kPa$

$T_1 = 247\,K \quad T_2 = 287\,K \quad T_3 = 287\,K \quad T_4 = 247\,K$

$(1 \to 2)$ $V =$ konst. $\Rightarrow p \sim T$

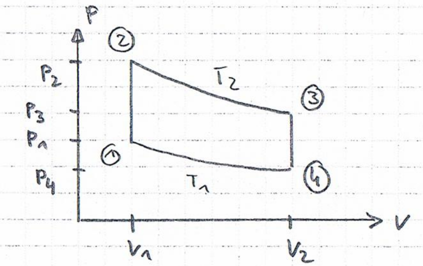
$\rightsquigarrow \quad p_2 = p_1 \cdot \frac{T_2}{T_1} = 269{,}8\,kPa$

$(2 \to 3)$ $T =$ konst. $\Rightarrow p \sim \frac{1}{V}$

$p_3 = \frac{p_2 V_2}{V_3} = 139{,}4\,kPa$

$(3 \to 4)$ $V =$ konst. $\quad p_4 = p_3 \frac{T_4}{T_3} = 120\,kPa$

b)



Stirling-Kreisprozess

c) Fläche unter Kurve im p-V-Diagramm $\hat{=}$ vom System abgegebene Arbeit

(2→3) Expansion : das System verrichtet Arbeit
(4→1) kompression : am System wird Arbeit verrichtet

$|W_{23}| > |W_{41}| \rightsquigarrow$ insgesamt wird vom System Arbeit abgegeben

d) $W = -\int_{V_a}^{V_e} p\,dV = -nRT \int_{V_a}^{V_e} \frac{dV}{V}$

$$\left.\begin{aligned} W_{23} &= -p_2 V_2 \ln \frac{V_3}{V_2} = -26{,}7\,J \\ W_{41} &= -p_1 V_1 \ln V_1/V_4 = 22{,}9\,J \end{aligned}\right\} \quad \Delta W = -3{,}8\,J$$

pro Zyklus abgegeben

e) $\eta = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 0{,}14$

ΔT muss größer werden $\Rightarrow \eta$ wird größer