Klausur zur Klassischen Experimentalphysik III (Optik + Thermodynamik) am 11.03.2015

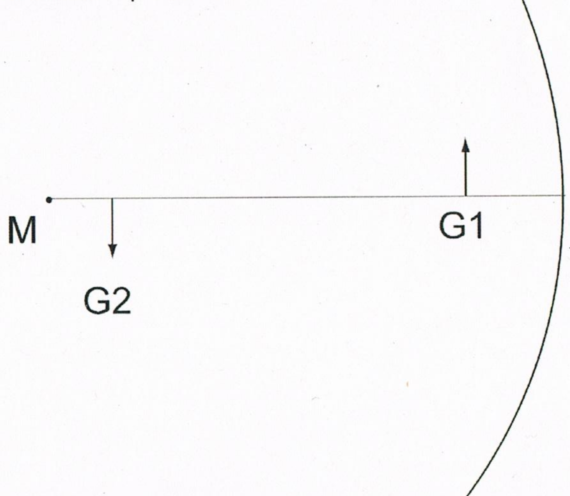
Name, Vorname:	Matrikelnummer:
Studiengang:	Wiederholungsprüfung? Nein ☐ Ja ☐

Aufgabe	1	2	3	4	5	6	Σ	Note
Max. Punkte	4	7	6	4	7	4	32	
Erreichte Punkte								

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

Aufgabe 1: (4 Punkte)

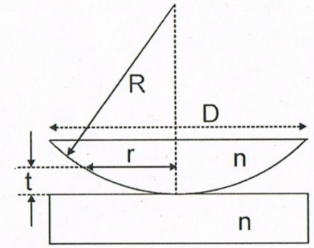
Zwei Gegenstände befinden sich vor einem sphärischen Spiegel.
Welche Strahlen können für die Bildkonstruktion verwendet werden?
Konstruieren Sie graphisch das Spiegelbild von G1 und G2.
Dazu sollten Sie zunächst den Brennpunkt des Spiegels bestimmen.
Sind die Spiegelbilder reell oder virtuell, vergrößert oder verkleinert bzw. aufrecht oder auf dem Kopf stehend?



Aufgabe 2: (0,5 + 3 + 1,5 + 2 = 7 Punkte)

a) Wofür steht das Akronym „LASER"?
b) Erklären Sie das Funktionsprinzip eines Lasers anhand eines Energieniveauschemas.
c) Das oberste relevante Energieniveau eines Lasers ist hat eine Energie von E_2 = 2,0 eV über dem Grundzustand. Wie ist dieses Niveau bei Raumtemperatur (T = 300 K) bzw. bei T = 1000 K allein durch die thermische Besetzung bevölkert? (e = $1{,}602 \cdot 10^{-19}$ C, Boltzmann-Konstante $k_B = 1{,}38 \cdot 10^{-23}$ J/K)
d) Was ist der Brewster-Winkel und wie wird er häufig bei einem Laser genutzt?

Aufgabe 3: (2,5 + 2 + 1,5 = 6 Punkte)

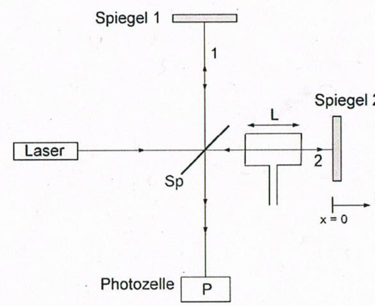


Eine Anordnung zum Ausmessen von Newtonschen Ringen besteht aus einer Glaslinse (Krümmungsradius R = 10 m, Durchmesser D = 4 cm, n = 1,5), die auf einer ebenen Glasplatte liegt.
Es entsteht eine dünne Luftschicht, deren Dicke t ($t << R$) sich mit dem Radius r ändert. Das Interferenzmuster wird im reflektierten Licht beobachtet (senkrecht von oben).

a) Wie viele helle Ringe würde man bei Beleuchtung der Anordnung mit gelben Licht (λ = 590 nm) sehen?
b) Wie groß ist der Durchmesser des 6. hellen Rings? Was ändert sich, wenn man den Luftspalt mit Wasser (n_w = 1,33 < n) füllt? Wie groß ist dann der Durchmesser des 6. hellen Rings?
c) Beobachtet man in der Mitte (am Auflagepunkt der Linse) ein Intensitätsmaximum oder ein Intensitätsminimum? Wie unterscheiden sich das transmittierte und das reflektierte Muster? Begründen Sie jeweils Ihre Antwort.

Aufgabe 4: (2 + 0,5 + 1,5 = 4 Punkte)

Das parallele Strahlbündel eines Lasers (λ = 600 nm) durchstrahlt eine Michelson-Anordnung mit halbdurchlässigem Spiegel (Sp), dem feststehenden Spiegel 1 und dem beweglichen Spiegel 2. Die Strahlung wird dabei in die Teilbündel 1 und 2 zerlegt, die miteinander interferieren. Zwischen Sp und Spiegel 2 befindet sich ein zunächst mit Luft gefülltes Glasgefäß der Länge L = 3cm. Die Dicke der Gefäßwand sowie Reflexionen daran werden vernachlässigt. Die Teilbündel können am Ort P der Photozelle beschrieben werden durch $E_1(t) = E_0 \cdot e^{-i\omega t}$ bzw. $E_2(t) = E_0 \cdot e^{-i(\omega t + \phi)}$.



a) Der Spiegel 2 wird um die Strecke x nach rechts verschoben. Geben Sie die Phasenverschiebung $\phi(x)$ an und berechnen Sie die Intensität $I(t)$ am Ort der Photozelle. Für welche Werte von x registriert die Photozelle ein minimales bzw. ein maximales Signal?
b) Der Spiegel 2 wird nun mit konstanter Geschwindigkeit v in x-Richtung bewegt. Zeigen Sie, dass sich $I(t)$ als Summe eines konstanten und eines oszillierenden Anteils darstellen lässt.
c) Der Spiegel 2 wird wieder bei x = 0 festgestellt und die Luft im Glasgefäß langsam gegen Helium ausgetauscht. Wie viele Intensitätsmaxima wandern bei diesem Vorgang vorbei? (n_L = 1,000293, n_{He} = 1,000036)

Nützliche Relation: $2 \cdot \cos^2\alpha = (1 + \cos 2\alpha)$

Aufgabe 5: (7 Punkte)

Das Schaubild zeigt einen konstruierten Kreisprozess, in dem der Wirkungsgrad gleich Null ist: in einem p-V-Diagramm sind zwei Isotherme, die von einer Adiabate gekreuzt werden. Man startet mit 1 mol eines idealen, einatomigen Gases am oberen Kreuzungspunkt A und expandiert isotherm bei 600 K bis zum Punkt B. An diesem Punkt wird das Gas mit einem kalten Reservoir (300 K) in Kontakt gebracht, sodass es isochor zum Punkt C abkühlt. Von dort aus expandiert es weiter isotherm zum unteren Kreuzungspunkt D. Zum Schluss erfolgt eine adiabatische Kompression von Punkt D zurück nach Punkt A. Die Isochore (von B nach C) wird so gewählt, dass die in diesem Kreisprozess verrichtete Arbeit Null ist. Berechnen Sie die folgenden Werte (Zahlenwerte):

a) Die Arbeit W_{DA}, die von D nach A verrichtet wird,

b) die Wärmemenge Q_{BC}, die zwischen Punkt B und C abgeführt wird,

c) die Entropieänderung im Gas von B nach C. Zeigen Sie dabei, dass gilt: Q_{AB} / 600 K + Q_{CD} / 300 K = 8,64 J/(mol·K)

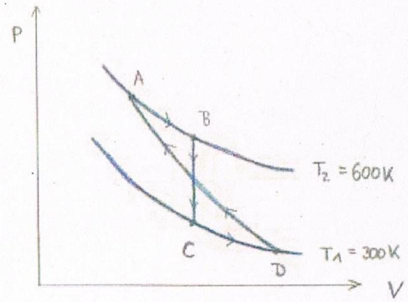
d) die Arbeit W_{AB}, die von A nach B verrichtet wird,

e) die Arbeit W_{CD}, die von C nach D verrichtet wird,

f) die Entropie, die ans Reservoir abgegeben wird.

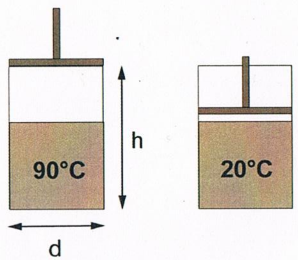
g) Zeichnen Sie das T-S-Diagramm.

Gaskonstante: R = 8,314 J/(mol·K)



Aufgabe 6: (4 Punkte)

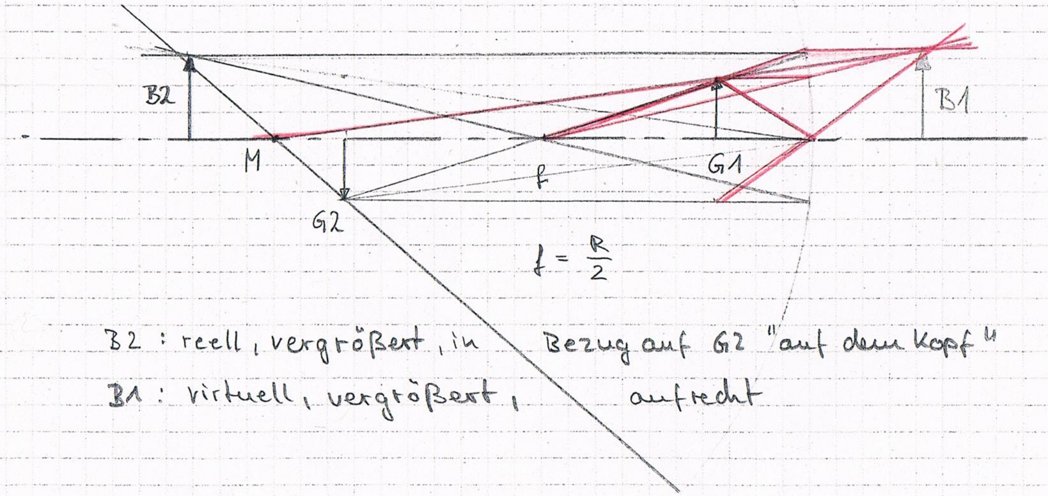
Beim Einkochen von Marmelade wurde übersehen, dass für das letzte Glas kein Deckel mehr da ist. Stattdessen wird ein luftdicht abschließender Gummistopfen verwendet, der oben aufs Glas gelegt wird. Beim Abkühlen der Marmelade von 90°C auf Raumtemperatur (20°C) wird der Gummistopfen ins Glas „gedrückt" (siehe Skizze). Am nächsten Tag soll der Stopfen durch einen richtigen Deckel ersetzt werden. Berechnen Sie das Volumen der vom Gummistopfen eingeschlossenen Luft nach dem Abkühlen.
Wie viel Arbeit muss verrichtet werden, um den Gummistopfen aus dem Glas zu ziehen (bei T = konst.)?



Hinweis: die Marmelade ist inkompressibel; R = 8,314 J/(mol·K), Höhe des Glases h = 16 cm, Durchmesser d = 8 cm, Füllhöhe h_m = 10 cm, Normaldruck p = 1 bar = 10^5 Pa, Reibungskräfte werden vernachlässigt.

Aufgabe 1

- Mittelpunktsstrahl
- Brennpunktsstrahl (-> achsenparalleler Strahl)
- achsenparalleler Strahl (-> Brennpunktsstrahl)
- Scheitelpunktsstrahl (Einfall- = Ausfallwinkel)



$f = \frac{R}{2}$

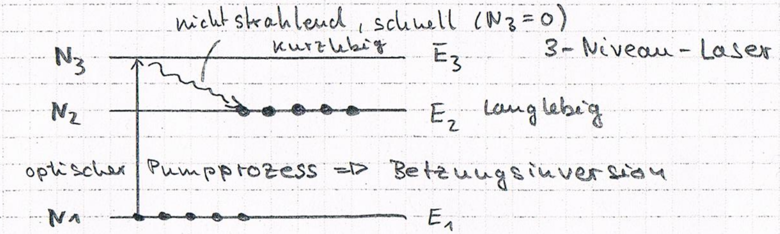
B2 : reell, vergrößert, in Bezug auf G2 "auf dem Kopf"

B1 : virtuell, vergrößert, aufrecht

Aufgabe 2

a) light amplification by stimulated emission of radiation

b)



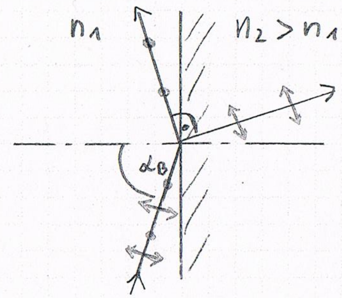
- durch optisches Pumpen wird eine Besetzungsinversion erzeugt, danach stimulierte Emission aus $E_2 \to E_1$
- das aktive Medium wird in einen optischen Resonator gebracht ⇝ Zahl der Photonen im Lasermode so hoch, dass die spontane gegenüber der induzierten Emission vernachlässigbar wird

c) $\frac{N_2}{N_1} = \exp\{-\frac{\Delta E}{k_B T}\}$ mit $\Delta E = 3{,}204 \cdot 10^{-19}\,J$

$T = 300\,K \leadsto N_2/N_1 = 2{,}45 \cdot 10^{-34}$

$T = 1000\,K \leadsto N_2/N_1 = 8{,}26 \cdot 10^{-11}$

d) Brewster-Winkel: bei Grenzfläche zwischen zwei Medien:



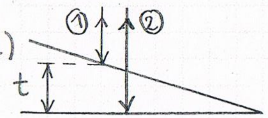
reflektierter Strahl und gebrochener Strahl stehen senkrecht aufeinander

⇝ Licht, das in der Einfallsebene polarisiert ist, wird nicht reflektiert, aber (vollständig) ins Medium gebrochen

⇝ Brewster-Fenster beim Laser (Laserstrahl trifft unter Brewster-Winkel auf Fenster)
zur Unterdrückung von Reflexionsverlusten beim Strahldurchgang durch Fenster für eine Polarisationsrichtung
(eine Polarisationsrichtung wird verstärkt, die andere herausgefiltert)

Aufgabe 3

a)



Gangunterschied zwischen ① und ②

$$\Delta s = 2t + \frac{\lambda}{2}$$

← Phasensprung am opt. dicht. Med. bei ②

helle Ringe ≙ konstruktive Interferenz : $\Delta s \overset{!}{=} z \cdot \lambda$

$$\rightsquigarrow z = \frac{1}{\lambda}\left(2t + \frac{\lambda}{2}\right) \qquad (z = 1,2,3,\dots)$$

Geometrie: $R^2 = r^2 + (R-t)^2 = r^2 + R^2 + t^2 - 2Rt$

$$r^2 = 2Rt - t^2 \approx 2Rt \qquad (t \ll R)$$

$$t = \frac{1}{2R} r^2$$

$$\rightsquigarrow z = \frac{1}{\lambda}\left(\frac{r^2}{R} + \frac{\lambda}{2}\right) \quad \text{mit } r_{max} = \frac{D}{2}$$

$$\rightsquigarrow \underline{z_{max}} = \frac{D^2}{4R\lambda} + \frac{1}{2} = 68{,}3 \approx \underline{68}$$

b) $z = 6$

$$\rightsquigarrow R\left(\lambda z - \frac{\lambda}{2}\right) = r^2 \Rightarrow d = 2r = 2\sqrt{R\left(\lambda z - \frac{\lambda}{2}\right)}$$

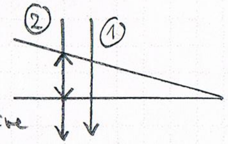
$$\underline{\underline{d = 1{,}14 \text{ cm}}}$$

$$1 < n_W < n_{Glas} \rightsquigarrow \Delta s_W = 2t n_W + \frac{\lambda}{2} \overset{!}{=} z \cdot \lambda$$

$$\dots \rightsquigarrow \underline{\underline{d}} = 2r = 2\sqrt{\frac{R}{n_W}\left(\lambda z - \frac{\lambda}{2}\right)} = \underline{\underline{0{,}99 \text{ cm}}}$$

c) direkt am Auflagepunkt: kein Luftspalt ⇝ kein Brechungsindexunterschied ⇒ keine Reflexion ⇒ Minimum (dunkel)

"unmittelbar daneben": $2tn \to 0$, aber Phasensprung an Grenzfläche ⇒ ebenfalls Minimum



Transmission: $\Delta s = 2t + \lambda \overset{!}{=} z \cdot \lambda$

für konstruktive Interferenz

⇝ Kontrastumkehr (hell ⇔ dunkel)

Intensität in Transmission ist wesentlich geringer!

Aufgabe 4

a)
$$\left.\begin{aligned} E_1(t) &= E_0 e^{-i\omega t} \\ E_2(t) &= E_0 e^{-i(\omega t + \phi)} \end{aligned}\right\} \underbrace{E_1(t) + E_2(t)}_{E(t)} = E_0 e^{-i\omega t}\left(1 + e^{-i\phi}\right)$$

$$\phi = k \cdot r = \frac{2\pi}{\lambda} 2x = \frac{4\pi}{\lambda} x$$

$$\rightsquigarrow E(t) = E_0 e^{-i\omega t}\left(1 + e^{-i\frac{4\pi}{\lambda}x}\right)$$

$$I(t) = E^* E = E_0^2\left(1 + 1 + e^{-i\frac{4\pi}{\lambda}x} + e^{i\frac{4\pi}{\lambda}x}\right)$$

$$= E_0^2\left(2 + 2\cos\frac{4\pi}{\lambda}x\right) = 2E_0^2\left(1 + \cos\frac{4\pi}{\lambda}x\right)$$

$$\underline{\underline{I(t) = 4E_0^2 \cos^2\left(\frac{2\pi}{\lambda}x\right)}}$$

Maximum: $\cos\frac{2\pi}{\lambda}x = 1 \rightsquigarrow \frac{2\pi}{\lambda}x = k \cdot \pi$

$$\underline{\underline{x = \frac{k\lambda}{2}}}$$

Minimum: $\cos\frac{2\pi}{\lambda}x = 0 \rightsquigarrow \frac{2\pi}{\lambda}x = \frac{(2k+1)}{2}\pi$

$$\underline{\underline{x = \frac{1}{4}(2k+1)\lambda}}$$

b)
$$I(t) = 2E_0^2\left(\underset{\text{Konst.}}{1} + \underset{\text{oszillierend}}{\cos}\frac{4\pi}{\lambda}v \cdot t\right)$$

c)
$$\left.\begin{aligned} L_{Luft} &= n_L \cdot L \\ L_{He} &= n_{He} \cdot L \end{aligned}\right\} \Delta L = (n_L - n_{He}) \cdot L$$

$$\Delta L = x = \frac{k \cdot \lambda}{2} = L(n_L - n_{He}) \Rightarrow k = \frac{2L(n_L - n_{He})}{\lambda}$$

$$\rightsquigarrow k = 25{,}7 \Rightarrow \underline{\underline{25 \text{ Maxima}}}$$

Aufgabe 5

a) $D \to A$: adiabatisch $(\Delta Q = 0)$; $\Delta U = \Delta Q + \Delta W$

$$W_{DA} = U_A - U_D = c_V \Delta T$$

(1mol, 1atomig) $\qquad \underline{\underline{W_{DA}}} = \frac{3}{2} R \cdot 300\,K = \underline{\underline{3740\,J}}$

b) $B \to C$: isochor $(\Delta W = 0)$

$$\rightsquigarrow \underline{\underline{Q_{BC}}} = U_B - U_C = \frac{3}{2} R \Delta T = \underline{\underline{3740\,J}}$$

c) Wegen $S_D = S_A \Rightarrow \Delta S_{AB} + \Delta S_{BC} + \Delta S_{CD} = 0$

mit: $\Delta S_{AB} = \frac{Q_{AB}}{T_2}$, $\Delta S_{CD} = \frac{Q_{CD}}{T_1}$ und

$$\Delta S_{BC} = c_V \ln \frac{T_1}{T_2} = \frac{3}{2} R \ln \frac{1}{2} \rightsquigarrow \underline{\underline{\Delta S_{BC} = -8{,}64 \frac{J}{K}}}$$

$$\rightsquigarrow \underline{\frac{Q_{AB}}{600K} + \frac{Q_{CD}}{300K} = 8{,}64 \frac{J}{K}} \qquad (*)$$

d+e) $A \to B$ und $C \to D$ isotherm $(\Delta U = 0)$

$\rightsquigarrow Q_{AB} = -W_{AB}$; $Q_{CD} = -W_{CD}$

$B \to C$ so gewählt, dass $\Sigma W = 0$ mit $W_{BC} = 0$

$\Rightarrow W_{AB} + W_{CD} + W_{DA} = 0$

$\Rightarrow Q_{AB} + Q_{CD} = 3740\,J$

mit $(*)$ $\Rightarrow \underline{\underline{W_{AB} = -Q_{AB} = -2296\,J}}$

$\qquad\qquad \underline{\underline{W_{CD} = -Q_{CD} = -1444\,J}}$

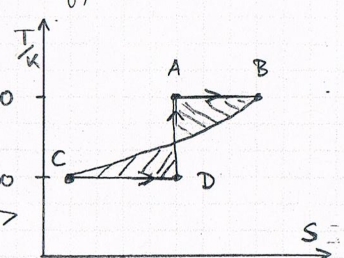
f) $\Delta S_{reservoir} = \Delta S_{BC} - \Delta S_{CD}$

$\qquad = (-8{,}64 + 4{,}81)\ J/K$

$\underline{\underline{\Delta S_{reserv} = 3{,}83\ J/K}}$

(> 0 nicht reversibel)

g)



(Dreiecksflächen gleich $\eta = 0$)

Aufgabe 6

Einfüllen : $T = 90°C = 363\,K$ (Marmelade + Luft)

Gummistopfen darauf $\Rightarrow n =$ konst (eingeschl. Luft)

$$n = \frac{p \cdot V}{RT} \qquad \text{mit } V_W = \pi \left(\frac{d}{2}\right)^2 (h - h_m)$$

$$V_W = 3{,}016 \cdot 10^{-4}\ m^3$$

$(h_W = 0{,}06\ m)$

$$\rightsquigarrow n = 9{,}99 \cdot 10^{-3}\ mol$$

nach Abkühlen : $T = 20°C = 293\,K$

$$\underline{\underline{V_K}} = \frac{nRT}{p} = \underline{\underline{2{,}434 \cdot 10^{-4}\ m^3}}$$

$(h_K = 0{,}048\ m)$

Arbeit : $W = \int_{S_0}^{S_E} F\, ds = \int_{S_0}^{S_E} A \Delta p\, ds$

mit : $p_0 V_0 = p_0 A S_0 = p_E V_E = p(s) V(s) = p(s) \cdot A \cdot s$

$\rightsquigarrow p(s) = \frac{S_0}{s} p_0$ und $\Delta p = p_0 - p(s) = p_0 \left(1 - \frac{S_0}{s}\right)$

$\rightsquigarrow W = A p_0 \int_{S_0}^{S_E} \left(1 - \frac{S_0}{s}\right) ds \qquad$ mit $ds = \frac{dV}{A}$

$\qquad S_0 = V_0/A = \frac{V_K}{A}$

$\qquad 1/s = A/V$

$$W = p_0 \int_{V_K}^{V_W} \left(1 - \frac{V_K}{V}\right) dV$$

$$W = p_0 \left[V - V_K \ln V \right]_{V_K}^{V_W}$$

$$W = p_0 V_K \left[\frac{V_W}{V_K} - 1 + \ln \frac{V_K}{V_W} \right]$$

$$\underline{\underline{W = 0{,}6\ J}}$$