TU München, Lehrstuhl E23
Walther-Meissner-Institut
L. Alff, R. Gross

Experimentalphysik III

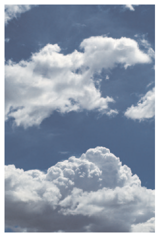
Vordiplom-Klausur

4. September 2003, MW 0001, 11:00-12:30

Aufgabe 1: Licht [$\sim$ 12/80 Punkte]

(i) Sonnenlicht ist nicht blau oder rot. Trotzdem sehen wie eine blauen Himmel und einen roten Sonnenuntergang. Erklären Sie diese Phänomene!

(ii) Welche Rolle spielt die Dichte der Atmosphäre?



(iii) Was ist Rayleigh-Streuung? Wie hängt sie von der Wellenlänge ab?

(iv) Was ist Mie-Streuung? Wie hängt sie von der Wellenlänge ab? Welche Farben am Himmel kann man mit dieser erklären?

Lösung 1: Licht [$\sim$ 12/80 Punkte]

(i) Da Sonnenlicht weiß ist, muss etwas in der Atmosphäre passieren. Die Atmosphäre ist ein Gemisch aus Stickstoff- und Sauerstoffmolekülen. Diese werden durch Licht zum Oszillieren angeregt und strahlen daher selber ab - mit *derselben* Frequenz. Das ist Streuung (**2 Punkte**). Blaues Licht hat eine viel kleinere mittlere freie Weglänge (etwa 50 km) als rotes Licht (etwa 180 km), d.h. es wird viel stärker gestreut. Da wir das Streulicht der Sonne aus dem Himmel sehen, erscheint dieser blau (**1 Punkt**). Das Abendlicht erscheint rot, da man bei niedrigem Sonnenstand direkter in die Sonne guckt. Da das blaue Licht aber weggestreut wird, bleibt rot übrig (**1 Punkt**).

(ii) Die Dichte der Atmosphäre ist wichtig, da hier kohärente/inkohärente Streuung eine Rolle spielt. Wegen der geringen Dichte sind die ausgesendeten seitlichen Elementarwellen von zufällig verteilten Gasatomen voneinander unabhängig. Dies ist genau 150 km oberhalb des Erdbodens der Fall, wo die Streuung des blauen Lichts stattfindet (**1 Punkt**). Bei dichten Medien tritt Interferenz auf (**1 Punkt**). Dadurch kommt es zu konstruktiver Interferenz in Vorwärtsrichtung und die Seitwärtsstreuung kann vernachlässigt werden (**1 Punkt**). Der Effekt ist um so größer, je dichter und geordneter das Medium ist.

(iii) Genau das ist Rayleigh-Streuung: Licht wird gestreut an Teilchen, deren Durchmesser sehr viel kleiner als die Wellenlänge des Lichtes ist (etwa 500 nm), etwa $\lambda/15$. Die Rayleigh-Streuung ist stark wellenlängenabhängig (**1 Punkt**). Die Abhängigkeit entsoricht der Dipolabstrahlung und geht daher mit $\propto \frac{1}{\lambda^4}$ (**1 Punkt**).

(iv) Mie-Streuung findet statt, wenn die Partikelgröße in den Bereich der Wellenlänge kommt bzw. größer als diese wird, also zum Beispiel bei regnerischem Wetter Wassertröpfchen (**1 Punkt**). Die Rayleigh-Streuung ist ein Grenzfall der Mie-Streuung bei kleinen Teilchen. Die Mie-Streuung hängt kaum von der Wellenlänge ab (**1 Punkt**). Man kann damit also das Weiß der Wolken erklären: alles Licht wird gestreut! Oder aber das Grau eines trüben Tages (**1 Punkt**).

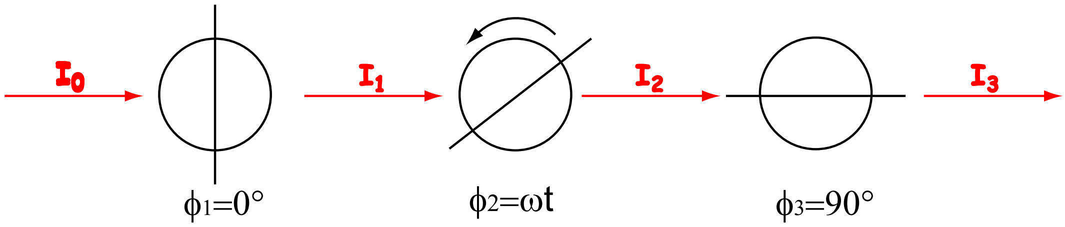
Aufgabe 2: Polarisation [$\sim$ 11/80 Punkte]

(i) Licht der Intensität $100\,\mathrm{W/m^2}$ aus einer Halogenlampe falle auf einen idealen Linearpolarisator mit senkrechter Durchlassrichtung. Wie groß ist die Intensität bei Austritt? Hinter den ersten Polarisator schaltet man nun einen weiteren Linearpolarisator mit horizontaler Durchlassrichtung. Wie groß ist die Intensität nach dem zweiten Polarisator? Zum Schluss bringt man noch einen dritten Linearpolarisator zwischen die beiden ersten. Seine Durchlassrichtung ist um 45° gedreht. Wie groß ist nun die Intensität nach allen drei Polarisatoren? Erklären Sie das auftretende „Paradoxon“!

(ii) Wir leiten einen Lichtstrahl durch zwei gekreuzte perfekte Polarisationsfilter, zwischen denen sich ein dritter, ebenfalls perfekter Polarisationsfilter befindet, der mit der Kreisfrequenz ω rotiert. Zeigen Sie, dass der transmittierte Lichtstrahl mit der Frequenz 4ω moduliert ist. Wie verhalten sich Amplitude und Mittelwert der transmittierten zur einfallenden Flussdichte?

Lösung 2: Polarisation [$\sim$ 11/80 Punkte]

(i) Nach Durchgang durch eine Folie bleibt die Hälfte der Intensität über, denn Licht kann ja immer in zwei senkrechte Komponenten aufgespalten werden. Also: $I_1 = 50\,\mathrm{W/m^2}$ (**1 Punkt**). Dann hat man eine gekreuzte Anordnung: Es kommt gar keine Intensität mehr durch: Null, gar nichts (**1 Punkt**). Alle horizontalen Komponenten hat man ja ausgefiltert. Führt man aber einen dritten Polarisator (im Winkel von 45° hier) ein, erhält man wieder Intensität. Und zwar nach Malus zunächst nach dem zweiten Filter: $I_2 = \frac{I_0}{2}\cos^2 45° = \frac{I_0}{4} = 25\,\mathrm{W/m^2}$ (**1 Punkt**). Nach dem nächsten hat man wiederum eine Halbierung der Intensität. Also: $I_3 = 12.5\,\mathrm{W/m^2}$ (**1 Punkt**). Dies erscheint paradox. Wieso kommt wieder Intensität durch, wenn man in eine Anordnung, die nichts durchlässt, noch einen weiteren Filter hinein stellt? Nun, die schwingenden Elektronen im zweiten Filter erzeugen wieder eine Komponente in der horizontalen Achse. Das linear polarisierte Licht dieses Filters lässt sich eben wieder in zwei senkrechte Komponenten zerlegen, die nun eben wieder eine geeignete Komponente erhalten. Diese Komponente wird also durch den Filter und den in ihm angeregten Schwingungen wieder erzeugt (**1 Punkt**).



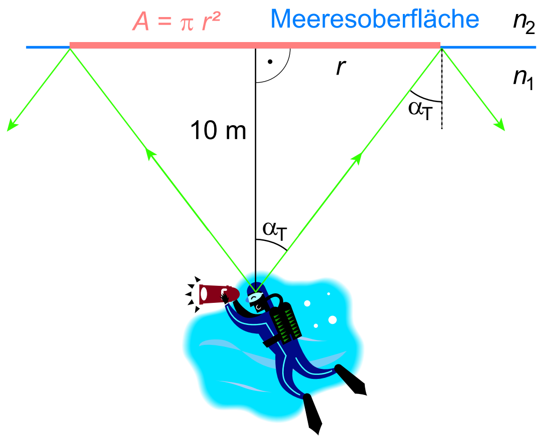
(ii) Der einfallende Lichtstrahl ist natürliches Licht und somit unpolarisiert. Daher erhält man sofort, dass $I_1 = I_0/2$ ist (**1 Punkt**). Weiterhin wird $I_2 = I_1 \cdot \cos^2 \omega t$ und $I_3 = I_2 \cdot \cos^2(90° - \omega t)$ sein (**1 Punkt**). Wir wissen, dass $\cos^2(90° - \omega t) = \sin^2 \omega t$ ist. Setzt man alles ein, so ergibt sich:
$I_3 = \frac{I_0}{2} \cos^2 \omega t \cdot \sin^2 \omega t = \frac{I_0}{8} \sin^2 2\omega t = \frac{I_0}{16}(1 - \cos 4\omega t)$ (**2 Punkte**). Das ist gerade die gesuchte Frequenz $4\omega t$. Anschaulich gedeutet bekommt man viermal pro Umdrehung gekreuzte Polarisatoren, also keine Intensität, $I_{3,\text{min}} = 0$. $I_{3,\text{max}} = \frac{I_0}{8}$ (**1 Punkt**). Für den Mittelwert ergibt sich: $\overline{I_3} = \frac{I_0}{16}$ (**1 Punkt**).

Aufgabe 3: Reflexion, Polarisation [$\sim$ 8/80 Punkte]

(i) Ein Taucher befindet sich in einer Tiefe von 10 m unter dem Wasserspiegel und schaut nach oben. Wie groß ist die Meeresoberfläche, durch die hindurch er Objekte außerhalb des Wassers sehen kann? Fertigen Sie eine saubere Skizze an!

(ii) Unter welchem Winkel muss man unpolarisiertes Licht in Luft (Brechungsindex $n = 1.000277$) auf eine Glasplatte (Kronglas, SK1) einfallen lassen, damit der reflektierte Anteil vollständig linear polarisiert ist? Wie ist der Vektor der elektrischen Feldstärke der reflektierten Lichtwelle dann orientiert? Skizze!

Lösung 3: Reflexion, Polarisation [~ 8/80 Punkte]



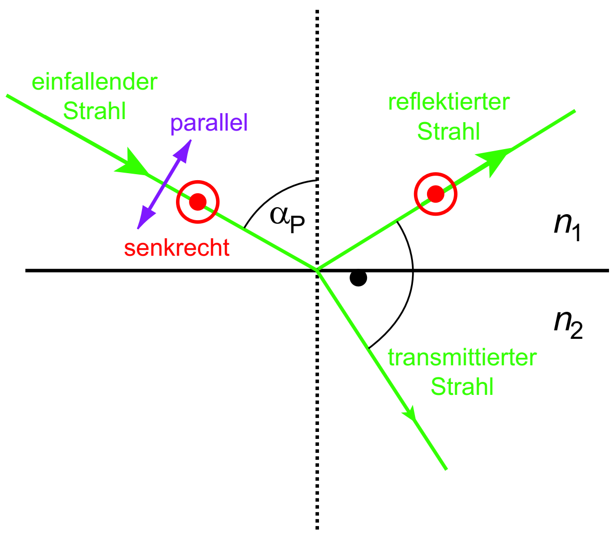
(i) Auf Grund der Totalreflexion beim Übergang vom optisch dichteren ins optisch dünnere Medium kann der Taucher nicht in jeder Richtung aus dem Wasser schauen (**2 Punkte** mit Skizze). Zunächst berechnet man den Grenzwinkel der Totalreflexion α_T ((**1 Punkt**)):

$$\sin\alpha_\mathrm{T} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{1.000277}{1.3333} = 0.75023 \Rightarrow \alpha_\mathrm{T} \approx 48.6^\circ.$$

Hierbei kann man den Brechungsindex von Luft auch 1 setzen (im Anhang sind die Indizes ja auch relativ zur Luft angegeben). Nun berechnet man den Radius r des Ausschnitts A der Meeresoberfläche, durch den hindurch der Taucher Objekte außerhalb des Wassers sehen kann. Die Fläche hat natürlich Kreisform (**1 Punkt**):

$$\tan\alpha_\mathrm{T} = \frac{r}{10\,\mathrm{m}} \Leftrightarrow r = 10\,\mathrm{m}\cdot\tan 48.6^\circ \approx 11.34\,\mathrm{m}.$$

Berechnung des Ausschnitts A der Meeresoberfläche: $A = \pi r^2$, also $A \approx 404\,\mathrm{m}^2$ (**1 Punkt**).



(ii) Der einfallende Lichtstrahl ist unpolarisiert, d.h. er enthält beide Polarisationsrichtungen (senkrecht und parallel) in gleichem Maße. Nach den Fresnelschen Formeln ergibt sich für parallel zur Einfallsebene polarisiertes Licht eine Nullstelle des Reflexionskoeffizienten als Funktion des Einfallswinkels (Einfallswinkel zum Lot hin gemessen). Beim Übergang von einem Medium mit Brechungsindex n_1 zu einem Medium mit Brechungsindex n_2 ist der sogenannte Polarisationswinkel α_P (Brewstersche Winkel), bei dem diese Nullstelle auftritt, gegeben durch (**2 Punkte**) [wer es nicht weiß, kann es sich leicht ableiten]:

$$\tan \alpha_\mathrm{P} = \frac{n_2}{n_1}$$

Mit $n_1 = 1$ (Luft) und $n_2 = 1.61$ (Kronglas SK 1) ergibt sich $\alpha_\mathrm{P} \approx 58.15°$. Für diesen Winkel wird kein parallel polarisiertes Licht reflektiert, folglich ist das gesamte reflektierte Licht senkrecht zur Einfallsebene polarisiert. Die Richtung des Vektors der elektrischen Feldstärke ist identisch mit der Polarisationsrichtung des Lichts (**1 Punkt**).

Aufgabe 4: Ebener Spiegel [$\sim$ 6/80 Punkte]

Vor einem ebenen Spiegel befindet sich im Abstand a ein Gegenstand der Größe y.

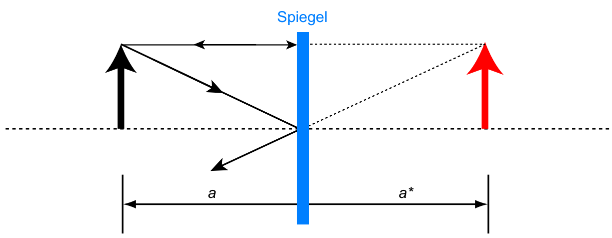
(i) Führen Sie die Bildkonstruktion durch! Und ganz sauber zeichnen! Ensteht ein virtuelles Bild?

(ii) Ermitteln Sie die Bildweite $a^\star$ mit Hilfe der Abbildungsgleichung!

(iii) Warum werden in einem Spiegel rechts und links, nicht aber oben und unten vertauscht?

Lösung 4: Ebener Spiegel [$\sim$ 6/80 Punkte]

(i) Für die Skizze gibt es **1 Punkt**.



Es ist natürlich ein virtuelles Bild (**1 Punkt**).

(ii) Nun, dies ist fast zu einfach. Die Abbildungsgleichung lautet (**1 Punkt**):

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{a} + \frac{1}{a^\star}$$

Nun gilt, da der ebene Spiegel einen unendlichen Krümmungsradius hat: $f = \infty$. Es folgt sofort (**1 Punkt**):

$$a^\star = -a.$$

(iii) Wenn man sich vor dem Spiegel auf die Seite legt, Kopf links, Füße rechts, so sieht man, dass ein Spiegel rechts und links gar nicht vertauscht. *Absolut* betrachtet ist es so, dass z.B. das Herz auf der gleichen Seite schlägt, nur vorne und hinten sind vertauscht. Genauer: Der Spiegel vertauscht die Richtungen, die parallel zu seiner Oberflächennormalen liegen. *Relativ* zu der Person im Spiegel, der man ja gegenüber steht, sagt man nicht vorne und hinten seien vertauscht. Man kann sagen, dass rechts und links vertauscht sind oder aber, dass die Seiten richtig sind, aber auf dem Kopf stehend. Das liegt aber an der subjektiven Wahrnehmung (**2 Punkte**)!

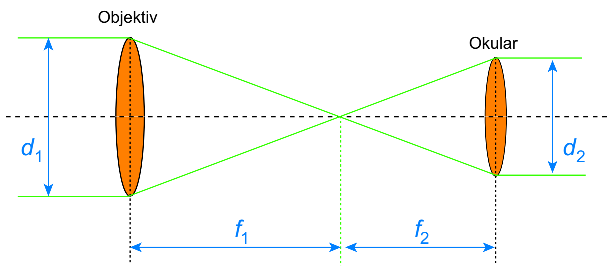
Aufgabe 5: Feldstecher [$\sim 8/80$ Punkte]

Zwei handelsübliche Prismenfeldstecher (als Keplersche Fernrohre anzusehen) haben die Bezeichnungen 8×30 und 7×50. Dabei bedeutet die erste Zahl die Normalvergrößerung Γ_0 und die zweite Zahl den Objektivdurchmesser d_1 in mm.

(i) Wie groß ist bei beiden Feldstechern der Durchmesser d_2 des hinter dem Okular austretenden Parallellichtbündels, das von einem unendlich fernen Dingpunkt stammt? Bitte eine klare Skizze!

(ii) Welcher der beiden Feldstecher ist teurer und schwerer? Unter welchen Bedingungen bringt dieser Feldstecher Vorteile im Leistungsvermögen gegenüber dem billigeren und leichteren Modell?

Lösung 5: Feldstecher [$\sim 8/80$ Punkte]



(i) Skizze ergibt **2 Punkte**. Strahlen kommen von einem unendlich fernen Punkt, sind also parallel. Laut Strahlensatz gilt (**1 Punkt**)

$$\frac{d_2}{d_1} = \frac{f_2}{f_1}.$$

$f_1/f_2 = \Gamma_0$ ist gerade die Normalvergrößerung (**1 Punkt**). Also haben wir

$$d_2 = \frac{d_1}{\Gamma_0}.$$

Damit ergibt sich (**2 Punkte**):

$$d_2 = \begin{cases} 3.8\,\mathrm{mm} & (8 \times 30) \\ 7.1\,\mathrm{mm} & (7 \times 50) \end{cases}$$

(ii) In der Dämmerung ist der Pupillendurchmesser des menschlichen Auges vergrößert. Sobald die Pupille größer als 3.8 mm ist, hat das Gerät 7×50, das natürlich auch größer und schwerer ist, Vorteile (**2 Punkte**).

Aufgabe 6: Interferometer [$\sim 9/80$ Punkte]

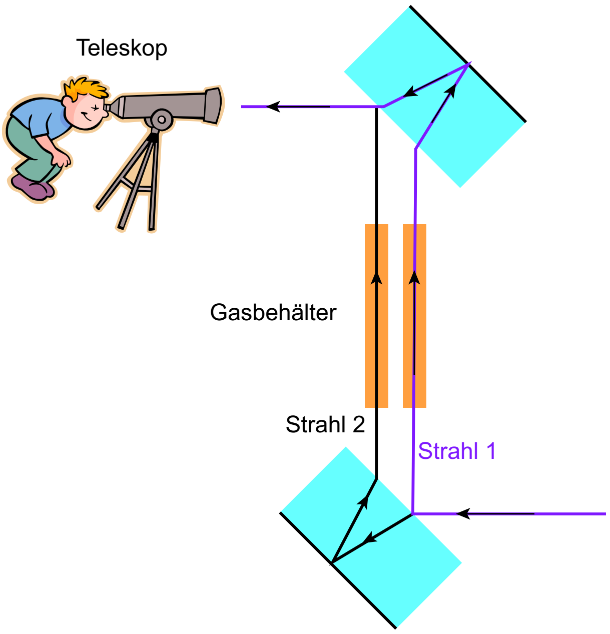


Abbildung 1: Jamin-Interferometer als Interferenzrefraktometer.

Sogenannte Jamin-Interferometer (siehe Zeichnung) werden als Interferenzrefraktometer zur Bestimmung von Brechzahlunterschieden von Gasen und Flüssigkeiten verwendet. Die Interferenz entsteht durch Aufspaltung und Wiedervereinigung eines Strahls mittels zweier planparalleler Platten gleicher Dicke, die einseitig verspiegelt sind. Die Beleuchtung erfolgt durch eine ausgedehnte Lichtquelle.

(i) Diskutieren Sie die Intensitäten der Teilstrahlen!

(ii) Die zwei identischen durchsichtigen Gasbehälter werden mit Argon gefüllt. Die Behälter sind 25 cm lang und Argon hat für das verwendete Natriumlicht einen Brechungsindex $n = 1.000281$. Luft ohne Argon hat einen Brechungsindex von $n = 1.000277$. Die Interferenzen werden durch das Teleskop beobachtet. Wieviele Maxima zählen Sie im Zentrum des Teleskops, wenn man eine der Kammern abpumpt?

Lösung 6: Interferometer [$\sim 9/80$ Punkte]

(i) Ein Teil des ankommenden Strahls wird reflektiert (Strahl 1). Er hat eine deutlich niedrigere Intensität als der transmittierte Strahl (Strahl 2) (**1 Punkt**). Letzterer wird an der verspiegelten Seite vollständig reflektiert und, aufgrund des kleinen Einfallswinkels, geht auch beim Verlassen der linken Platte nur wenig Intensität verloren (**1 Punkt**). An der oberen Platte sind die Verhältnisse umgekehrt (**1 Punkt**). Jetzt verliert Strahl 2 bei der Refklexion an Intensität und Strahl 1 erhält den größten Teil seiner Intensität. Damit haben die sich überlagernden Teilstrahlen nahezu gleiche Intensität (**1 Punkt**).

(ii) Die Gangdifferenz ist die Differenz der optischen Wege zwischen gefüllter und abgepumpter Kammer (**1 Punkt**). Im abgepumpten Zustand ist der Brechungsindex gleich 1. Die Differenz ergibt sich also zu (**2 Punkte**):

$$(n-1)L = (1.000281 - 1) \cdot 0.25\,\mathrm{m} = 7.025 \cdot 10^{-5}\,\mathrm{m}.$$

Zwischen zwei Maxima muss sich der optische Weg um eine Wellenlänge ändern (**1 Punkt**). Also ist die Zahl der Maxima, die beim Abpumpen entstehen (**1 Punkt**)

$$\frac{7.025 \cdot 10^{-5}}{589 \cdot 10^{-9}} = 119.3.$$

Aufgabe 7: Tolansky-Verfahren [$\sim$ 7/80 Punkte]

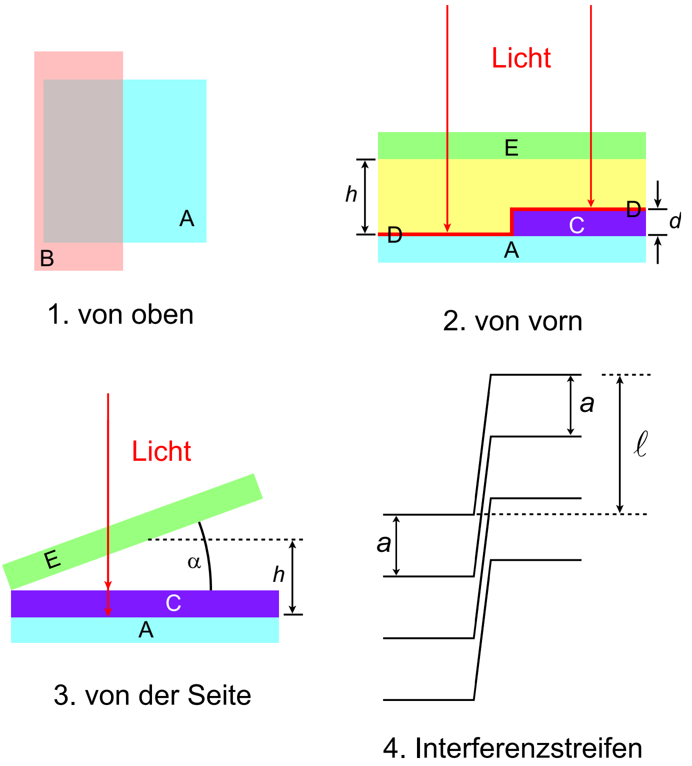


Abbildung 2: Zu Aufgabe 7.

Die Dicke einer Aufdampfschicht kann nach Tolansky in der nachfolgend beschriebenen Weise gemessen werden: Beim Aufdampfen wird die Unterlage A teilweise durch eine Blende B abgedeckt (siehe Teilfigur 1), so dass die Aufdamfschicht C durch eine Stufe begrenzt wird (siehe Teilfigur 2). Anschließend wird auf die Aufdampfschicht C und den unbedampften Teil der Unterlage eine reflektierende Schicht D (z.B. Silber) aufgebracht (siehe Teilfigur 2). Danach wird ein halbdurchlässiges verspiegeltes Deckgläschen E um einen kleinen Winkel α angekippt über die Stufe gelegt (siehe Teilfigur 3). Bei senkrecht einfallendem monochromatischem Licht (Wellenlänge $\lambda = 546\,\mathrm{nm}$, grüne Spektrallinie von Quecksilber) werden im reflektierten Licht Interferenzstreifen mit dem Abstand $a = 4.8\,\mathrm{mm}$ beobachtet, die an der Stufe um die Strecke $\ell = 13\ \mathrm{mm}$ gegeneinander versetzt sind (siehe Teilfigur 4). Wie wird die Schichtdicke d aus a, ℓ und λ berechnet? Der Winkel α ist dabei so klein, dass die Abweichung des reflektierten Lichts von der Senkrechten vernachlässigt werden darf. Zeichnen Sie eine klare Skizze!

Lösung 7: Tolansky-Verfahren [$\sim$ 7/80 Punkte]

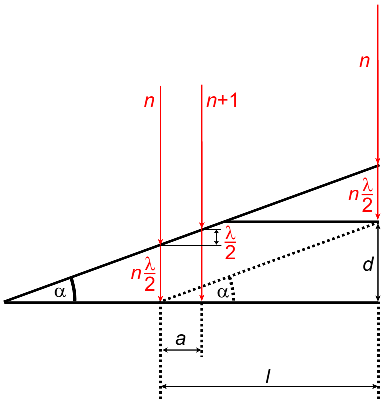


Abbildung 3: Zu Aufgabe 7.

(Skizze: **2 Punkte**). Das Entstehen der Interferenzstreifenbreite a zwischen der Ordnung n und $n+1$ sowie der Interferenzstreifenversetzung an der Stufe wird an der Skizze deutlich. Beugungsmaxima benachbarter Beugungsordnungen haben den Abstand a. Der Gangunterschied beträgt gerade eine halbe Wellenlänge. Man liest sofort die Gleichung für α ab (**2 Punkte**):

$$\tan\alpha = \frac{\lambda}{2a}.$$

Das Maximum der gleichen Beugungsordnung auf und neben der Aufdampfschicht hat den Abstand ℓ. Es ergibt sich eine weitere Gleichung für α (**2 Punkte**):

$$\tan\alpha = \frac{d}{\ell}.$$

Insgesamt folgt (**1 Punkt**):

$$d = \frac{\lambda l}{2a} \approx 740\,\mathrm{nm}.$$

Aufgabe 8: Lautsprecher [$\sim$ 6/80 Punkte]

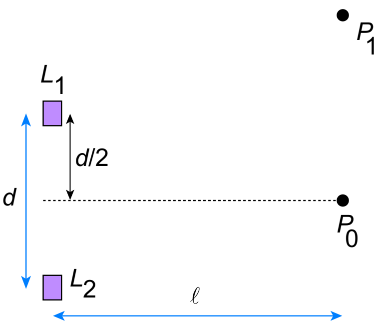


Abbildung 4: Zu Aufgabe 8.

Zwei im Abstand $d = 2.5\,\mathrm{m}$ voneinander angeordnete Lautsprecher L_1 und L_2 strahlen phasengleich einen Messton ab, den ein Beobachter im Abstand $\ell = 3.5\,\mathrm{m}$ bei P_0 wahrnimmt. Wenn sich der Beobachter von P_0 nach P_1 bewegt, nimmt die Lautstärke ab und erreicht bei P_1 ein Minimum. Der Abstand zwischen P_0 und P_1 beträgt $y = 1.55\,\mathrm{m}$. Welche Frequenz ν hat der Messton?

Lösung 8: Lautsprecher [$\sim$ 6/80 Punkte]

Es gilt immer und stets $\nu = \frac{c}{\lambda}$, hier ist aber c die Schallgeschwindigkeit, etwa $345\,\mathrm{m/s}$ (**1 Punkt**). Wie können wir λ ausrechnen? Der Wegunterschied der Welle von Lautsprecher L_1 zu Punkt P_1 (Strecke s_1) zum Weg von Lautsprecher 2 zu Punkt P_1 (Strecke s_2) muss gerade eine halbe Wellenlänge sein (**2 Punkte**). Also

$$\lambda = 2(s_2 - s_1)$$

Der Skizze kann man entnehmen (**2 Punkte**):

$$s_1^2 = \left(y - \frac{d}{2}\right)^2 + \ell^2$$
$$s_2^2 = \left(y + \frac{d}{2}\right)^2 + \ell^2$$

Nach Einsetzen erhält man zunächst $s_1 \approx 3.513\,\mathrm{m}$ und $s_2 \approx 4.482\,\mathrm{m}$. Also $\lambda \approx 1.938\,\mathrm{m}$ und dann $\nu \approx 178\,\mathrm{Hz}$ (**1 Punkt**).

Aufgabe 9: Argonlaser [$\sim$ 5/80 Punkte]

Eine $50.0\,\mathrm{cm}^3$ große Kammer ist mit Argongas unter einem Druck von $20.3\,\mathrm{Pa}$ bei einer Temperatur von $0°\mathrm{C}$ gefüllt. Nahezu alle Atome befinden sich dabei im Grundzustand. Ein Lichtblitz aus einer Röhre, die die Kammer umgibt, hebt 1.0% der Atome in den gleichen angeregten Zustand mit einer mittleren Lebensdauer von $1.4 \cdot 10^{-8}\,\mathrm{s}$ an. Wie groß ist die Rate , mit der das Gas anschließend Photonen emittiert, maximal (sie fällt natürlich mit der Zeit ab)? Nehmen Sie an, dass es sich um ein ideales Gas handelt und dass nur spontane Emission auftritt.

Lösung 9: Argonlaser [$\sim$ 5/80 Punkte]

Man muss zunächst die Anzahl de vorhandenen Atome bestimmten. Die allgemeine Gasgleichung sagt uns (**2 Punkte**):

$$pV = nRT.$$

R steht im Anhang. Man erhält $n = 4.47 \cdot 10^{-7}\,\mathrm{mol}$. Also haben wir $2.68 \cdot 10^{17}$ Atome (wir haben mit $6 \cdot 10^{23}$ multipliziert), von denen $2.68 \cdot 10^{15}$ angeregt werden (**1 Punkt**). Die Emissionsrate beträgt $\dfrac{2.67 \cdot 10^{15}}{\tau} = 1.91\dot{1}0^{23}$ Photonen pro Sekunde (**2 Punkte**).

Aufgabe 10: Laserlichtbündel [$\sim$ 8/80 Punkte]

Mit einem streng parallelen Laserlichtbündel (Wellenlänge $\lambda = 650\,\mathrm{nm}$) aus einem Laser mit einer Blende des Durchmessers $d_0 = 1\,\mathrm{m}$ soll von der Erde aus ein Fleck auf der Mondoberfläche bestrahlt werden. Die Entfernung Erde-Mond beträgt $\ell = 384000\,\mathrm{km}$. Welchen Durchmesser d hat das bestrahlte Gebiet auf dem Mond? Skizze!

Lösung 10: Laserlichtbündel [~ 8/80 Punkte]

Das Laserlicht tritt aus einer kreisrunden Öffnung aus. Statt eines Lichtpunktes, wie es aus einer geometrischen Abbildung folgen würde, erhält man ein Beugungsscheibchen (**2 Punkte**). Die Begrenzung dieses Scheibchens ist durch den Winkel gegeben, für den die bei der Beugung verwendete Besselfunktion 1. Ordnung ein Minimum hat. Die Formel ist im Anhang angegeben. Für den ersten Winkel gilt die Beziehung (**2 Punkte**):

$$\sin \alpha_0 = 0.61 \frac{\lambda}{r},$$

wobei $r = d_0/2$ ist. (Skizze: **1 Punkt**) Natürlich kann man nähern: $\alpha_0 \ll 1$. Es folgt weiterhin aus der Skizze (**1 Punkt**):

$$\sin \alpha_0 \approx \alpha_0 = \frac{d}{2\ell}.$$

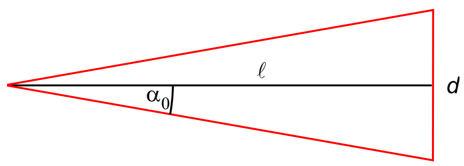


Abbildung 5: Zu Aufgabe 10.

Damit ergibt sich:

$$\frac{d}{2\ell} = 0.61 \cdot 2 \frac{\lambda}{d_0}.$$

Setzt man die Zahlenwerte ein, so erhält man die Lösung (**2 Punkte**):

$$d = 2.44 \frac{\ell\lambda}{d_0} \approx 609\,\mathrm{m}.$$

ANHANG

Brechzahl n			
bezogen auf Luft von 20°C und 101.3 kPa für 589.3 nm			
Äthylalkohol	1.3617	Kronglas FK 3	1.46444
Ammoniak	1.325	Kronglas BK 1	1.51002
Anilin	1.586	Kronglas BK 7	1.51625
Diamant	2.4173	Kronglas K 3	1.51814
Diäthyläther	1.3529	Kronglas SK 1	1.61016
Flintglas F 3	1.61279	Plexiglas	1.491
Flintglas SF 4	1.75496	Polystyrol	1.588
Glyzerin	1.4695	Quarzglas	1.4584
Kalkspat, o	1.65836	Schwefelkohlenstoff	1.6277
Kalkspat, ao	1.48643	Steinsalz	1.5443
Kanadabalsam	1.542	Tetrachlorkohlenstoff	1.4607
Kassiaöl	1.604	Wasser	1.33299
Benzol	1.5014	Zedernholzöl	1.505

Für Kronglas gilt $n_{\text{rot}} = 1.5076$ und $n_{\text{violett}} = 1.5236$.

$h \approx 6.6 \cdot 10^{-34}\,\text{Js}$ $\quad R = 8.341\,\dfrac{\text{J}}{\text{mol}\cdot\text{K}}$ $\quad m_{\text{Neutron}} \approx 1.67 \cdot 10^{-27}\,\text{kg}$ $\quad k_{\text{B}} = 1.38 \cdot 10^{-23}\,\dfrac{\text{J}}{\text{K}}$

$\sin 2x = 2 \sin x \cos x$ $\quad \cos 2x = \cos^2 x - \sin^2 x$ $\quad$ Wellenlänge von Natriumlicht: 589 nm

Linsengleichung einer brechenden Kugeloberfläche: $\dfrac{n_1}{g} + \dfrac{n_2}{b} = \dfrac{n_2 - n_1}{f}$

Reflexionsvermögen (α: Einfallswinkel, β: Ausfallswinkel) für die zur Einfallsebene senkrechte Komponente: $\rho = \left(\dfrac{n_1 \cos\alpha - n_2 \cos\beta}{n_1 \cos\alpha + n_2 \cos\beta}\right)^2$

Reflexionsvermögen (α: Einfallswinkel, β: Ausfallswinkel) für die zur Einfallsebene parallel Komponente: $\rho = \left(\dfrac{n_2 \cos\alpha - n_1 \cos\beta}{n_2 \cos\alpha + n_1 \cos\beta}\right)^2$

Die Intensitätsverteilung einer Besselschen Beugungsfigur ist proportional zu $J_1(\alpha)^2$ mit $\alpha = 2\pi R \sin\varphi/\lambda$.

Nullstellen der Bessel-Funktionen

In der folgenden Tabelle sind die ersten positiven Wurzeln von $J_n(x) = 0$ und $J_n'(x) = 0$ aufgeführt.

	$n = 0$	$n = 1$	$n = 2$	$n = 3$	$n = 4$	$n = 5$	$n = 6$
$J_n(x) = 0$	2.4048	3.8317	5.1356	6.3802	7.5883	8.7715	9.9361
	5.5201	7.0156	8.4172	9.7610	11.0647	12.3386	13.5893
	8.6537	10.1735	11.6198	13.0152	14.3725	15.7002	17.0038
	11.7915	13.3237	14.7960	16.2235	17.6160	18.9801	20.3208
	14.9309	16.4706	17.9598	19.4094	20.8269	22.2178	23.5861
	18.0711	19.6159	21.1170	22.5827	24.0190	25.4303	26.8202
$J_n'(x) = 0$	0.0000	1.8412	3.0542	4.2012	5.3176	6.4156	7.5013
	3.8317	5.3314	6.7061	8.0152	9.2824	10.5199	11.7349
	7.0156	8.5363	9.9695	11.3459	12.6819	13.9872	15.2682
	10.1735	11.7060	13.1704	14.5859	15.9641	17.3128	18.6374
	13.3237	14.8636	16.3475	17.7888	19.1960	20.5755	21.9317
	16.4706	18.0155	19.5129	20.9725	22.4010	23.8036	25.1839