

Vorname:

Name:

Matrikelnummer:

Studiengang:

Aufgabe I: Fragen über Fragen (24,5 Punkte)

- a) Wie sieht die mathematische Darstellung einer allgemeinen ebenen elektromagnetischen Welle in Vektorform aus? Beschreiben Sie kurz die wesentlichen Kenngrößen von Licht. (3,5 Punkte)
- b) Was sind die wesentlichen Wechselwirkungsmechanismen von Licht und Materie (2 Punkte)
- c) Nennen Sie das exakte Gesetz für Brechung von Strahlen an Grenzflächen, welches Grundlage der geometrischen Optik ist. Was ist im Gegensatz das Grundgesetz der sog. paraxialen Optik? Nennen Sie zwei Effekte die nicht mit paraxialer Optik beschreibbar sind. (2 Punkte)
- d) Was ist der Unterschied zwischen Abbildungsmaßstab und Vergrößerung? (2 Punkte)
- e) Nennen und erklären Sie stichpunktartig zwei monochromatische Bildfehler/Aberrationen und einen sogenannten Farbfehler? (3 Punkte)
- f) Was sind die beiden Elemente im Auge, die den Großteil der Gesamtbrechkraft liefern. Nennen Sie grob die Gesamtbrechkraft und die Einzelbeiträge? Was ist das Auflösungsvermögen eines gesunden Auges? (3 Punkte)
- g) Was versteht man unter Refraktionsfehler in der Augenheilkunde? Nennen Sie 2 verschiedene Typen mit dem Fachbegriff. (3 Punkte)
- h) Ein Mikroskop hat eine $NA=0.5$ und wird visuell eingesetzt. Macht hier eine Vergrößerung von 2000X noch Sinn? Begründen Sie Ihre Antwort. (2 Punkte)
- i) Zwischen Orts- und Winkelraum besteht in der Optik eine Fourier-Beziehung. Welche Winkelverteilung (Skizze oder math. Funktion) würden Sie bei Einfall einer ebenen Welle auf einen Spalt erwarten? Was passiert im Winkelraum wenn der Spalt um den Faktor 2 verkleinert wird? (2 Punkte)
- j) Sie kaufen eine 1W Neonröhre und eine 1W grüne LED. Wo würden Sie mehr LUMEN erwarten. Begründen Sie Ihre Antwort. (2 Punkte)

Aufgabe II: Abbildung mit einer dicken Linse (20 Punkte)

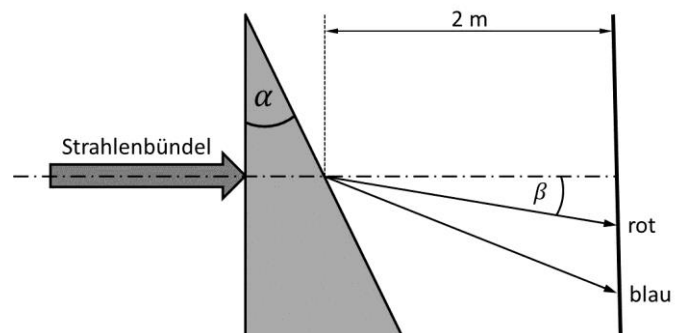
Wir betrachten eine dicke Sammellinse aus Glas mit den Radien $r_1 = 8 \text{ cm}$ und $r_2 = -12 \text{ cm}$. Die Linse habe eine Dicke von $d = 4 \text{ cm}$ und ihr Glas weist einen Brechungsindex von $n_{\text{Linse}} = 1,4$ auf.

- Welche Brechkraft φ in Dioptrien weist diese Linse auf? (4 Punkte)
- Berechnen Sie die Lage der Hauptebenen a_{1H} und $a'_{2H'}$. Fertigen Sie eine Skizze der Linse an und zeichnen Sie dort die Hauptebenen H und H' sowie die Strecken a_{1H} und $a'_{2H'}$ ein. (5 Punkte)
- Sie wollen nun ein Objekt, welches sich in einem Abstand von $s_0 = -20 \text{ cm}$ vor dem linken Scheitel der Linse befindet scharf auf einen Schirm abbilden. In welcher Entfernung s'_0 müssen sie den Schirm vom rechten Scheitel der Linse für eine scharfe Abbildung positionieren? (4 Punkte)
- Sie positionieren nun in einem Abstand $s = -10 \text{ cm}$ von der Hauptebene H der Linse eine Blende mit einem Durchmesser von $D_{\text{Blende}} = 2 \text{ cm}$. In welcher Entfernung s' von der Hauptebene H' entsteht die Austrittspupille und welchen Durchmesser hat sie? Welche Öffnungszahl k weist dieses System auf? (4 Punkte)
- Sie wollen nun mithilfe einer zweiten Linse, welche eine Brechkraft von $\varphi_2 = 5 \text{ dpt}$ aufweist, ein optisches System mit einer Gesamtbrechkraft von $\Phi_{\text{ges}} = -4 \text{ dpt}$ aufbauen. In welcher Entfernung d müssen Sie hierfür die beiden Linsen voneinander entfernt positionieren? Gehen Sie dabei von dünnen Linsen aus. (3 Punkte)

Aufgabe III: Dispersionsprisma (5,5 Punkte)

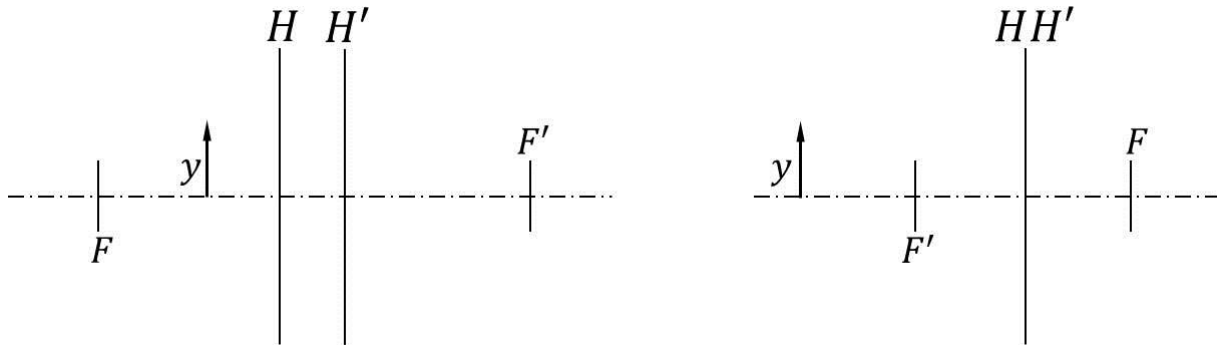
Sie betrachten ein Prisma mit einem Keilwinkel von $\alpha = 25^\circ$. Ein Strahlenbündel welches alle Wellenlängen zwischen $\lambda_1 = 400 \text{ nm}$ und $\lambda_2 = 700 \text{ nm}$ enthält, fällt senkrecht auf dieses Prisma. Gehen Sie dabei davon aus, dass das Prisma von Luft umgeben ist.

- Ab welcher Brechzahl wird das einfallende Strahlenbündel an der Hypotenuse des Prismas totalreflektiert? (1,5 Punkt)
- Aus einem Glaskatalog entnehmen Sie die Werte für die Brechzahl in Abhängigkeit der Wellenlänge. Dabei ist für die Wellenlänge λ_1 die Brechzahl $n_{(1; 400 \text{ nm})} = 1,53$ und für die Wellenlänge λ_2 die Brechzahl $n_{(2; 700 \text{ nm})} = 1,51$. Berechnen Sie den Ablenkwinkel β (siehe Skizze) für die Wellenlängen λ_1 und λ_2 . (4 Punkte)



Aufgabe III: Strahlkonstruktion (6 Punkte)

Konstruieren Sie die Bilder y' der beiden optischen Systeme.


Aufgabe IV: ABCD-Matrix und Mikroskop (9 Punkte)

Gegeben sei ein Mikroskop aus zwei dünnen Linsen: Dem Objektiv und dem Okular. Die Brennweite des Objektivs ist $f'_{obj.} = 40 \text{ mm}$ und die des Okulares $f'_{oku.} = 50 \text{ mm}$. Der Abstand zwischen Objektiv und Okular sei $d = 150 \text{ mm}$.

- Berechnen Sie die ABCD-Matrix dieses Linsensystems. Ein Lichtstrahl fällt unter einer Höhen von $y_1 = 0,5 \text{ cm}$ und einem Winkel von $u_1 = 5^\circ$ (beider Werte zur optischen Achse) auf das Objektiv. Unter welchem Winkel u_2 in Grad und unter welcher Höhen y_2 zur optischen Achse verlässt dieser Strahl das Okular? (6 Punkte)
- Welche Vergrößerung Γ weist dieses Mikroskop auf? (3 Punkte)

Aufgabe V: Beleuchtung und Laser (11 Punkte)

- Sie verwenden einen grünen Laserpointer mit $\lambda_{grün} = 550 \text{ nm}$. Dieser beleuchtet einen gesamten Winkelbereich von $2 \cdot \theta = 5^\circ$ mit einer konstanten Lichtstärke von $I_V = 25 \text{ cd}$ aus. Welche Photonenenergie E emittiert der Laserpointer und wie hoch ist seine Strahlungsleistung in Watt bei einer kegelförmigen Beleuchtung? (5 Punkte)
(Plancksches Wirkungsquantum $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$,
Lichtgeschwindigkeit $c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ und spektrales Helligkeitsempfinden $V_{(550 \text{ nm})} = 1$)
- Sie verwenden den Laserpointer aus Aufgabenteil b) um damit biologisches Gewebe zu beleuchten. Der Laserstrahl hat nach einer Eindringtiefe von $z = 2 \text{ mm}$ die Hälfte seiner Anfangsintensität I_0 . Wie groß ist der Absorptionskoeffizient α des biologischen Gewebes? (2 Punkte)
- Sie verwenden nun einen CO_2 -Laser. Dieser hat bei einer Entfernung von $z = 2000 \text{ m}$ einen Strahlradius von $w_{(2000 \text{ m})} = 10 \text{ cm}$. Wie groß ist der minimale Strahlradius w_0 des Lasers, wenn seine Rayleighlänge $z_0 = 6 \text{ m}$ beträgt? Welche Wellenlänge λ emittiert der Laser? (4 Punkte)

Aufgabe 2:

Ges: $r_1 = 80 \text{ mm}$ $r_2 = -120 \text{ mm}$ $d = 40 \text{ mm}$ $n = 1,4$

a) $\varphi = (n-1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) + \frac{d \cdot (n-1)^2}{n \cdot r_1 \cdot r_2}$ Strecken und Radien in m!

$$= 0,4 \left(\frac{1}{0,08} + \frac{1}{0,12} \right) - \frac{0,04 \cdot 0,4^2}{1,4 \cdot 0,08 \cdot 0,12}$$

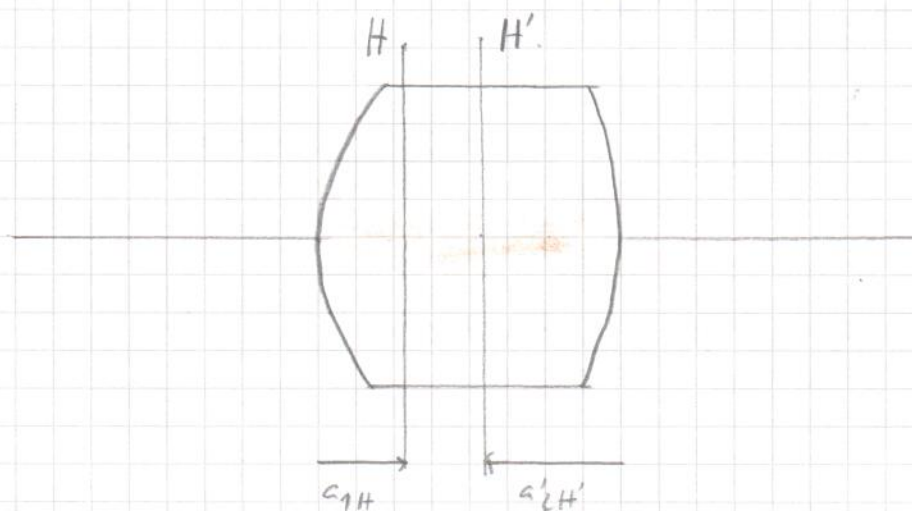
$$= 7,857 \text{ dpt} \quad (\hat{=} f' = 127,275 \text{ mm})$$

b) $\varphi_1 = \frac{n' - n}{r} = \frac{1,4 - 1}{0,08} = 5 \text{ dpt}$

$$a_{1H} = 127,275 \text{ mm} \cdot 3,33 \cdot 5 \text{ dpt} \cdot \frac{0,04 \text{ m}}{1,4} = \frac{12,11 \text{ mm}}{18,18 \text{ mm}}$$

$$\varphi_2 = \frac{1 - 1,4}{-0,12} = 3,33 \text{ dpt}$$

$$a'_{2H'} = -127,275 \text{ mm} \cdot 5 \text{ dpt} \cdot \frac{0,04 \text{ m}}{1,4} = -18,18 \text{ mm}$$



$$c) \quad s = s_0 - s_{1H} = -200 \text{ mm} - 12,1 \text{ mm} = -212,1 \text{ mm}$$

$$\frac{1}{s'} = \frac{1}{f'} + \frac{1}{s} = \frac{1}{127,21 \text{ mm}} - \frac{1}{212,1 \text{ mm}} = 0,00274247 \frac{1}{\text{mm}}$$

$$s' = 378,22 \text{ mm}$$

$$s_0' = 378,22 \text{ mm} - 18,18 \text{ mm} = 300,04 \text{ mm} (= s' + s_{2H}')$$

$$d) \quad \frac{1}{s'} = \frac{1}{f'} + \frac{1}{s} = \frac{1}{127,215 \text{ mm}} - \frac{1}{100 \text{ mm}} = -0,002143 \frac{1}{\text{mm}}$$

$$s' = -466,64 \text{ mm}$$

$$\frac{y'}{y} = \frac{s'}{s} \Rightarrow y' = \frac{s'}{s} \cdot y = \frac{-466,64}{-100} \cdot 2 \text{ cm} = 9,33 \text{ cm}$$

$$h = \frac{s'}{D_{\text{Blende}}} = \frac{127,275}{20} = 6,36$$

$$e) \quad q_{\text{ges}} = q_1 + q_2 - d q_1 q_2$$

$$\Leftrightarrow d q_1 q_2 = q_1 + q_2 - q_{\text{ges}}$$

$$d = \frac{q_1 + q_2 - q_{\text{ges}}}{q_1 q_2} = \frac{7,86 \text{ dpt} + 5 \text{ dpt} + 4 \text{ dpt}}{7,86 \text{ dpt} \cdot 5 \text{ dpt}}$$

$$= 0,429 \text{ mm} = 42,9 \text{ cm}$$

Aufgabe 3:

a) $\alpha = 25^\circ$ $\sin i_6 = \frac{n'}{n}$

$\Rightarrow n = \frac{\sin i_6}{\sin 25^\circ}$ $n = \frac{n'}{\sin i_6} = \frac{1}{\sin 25^\circ}$

$n = 2,366$

b)

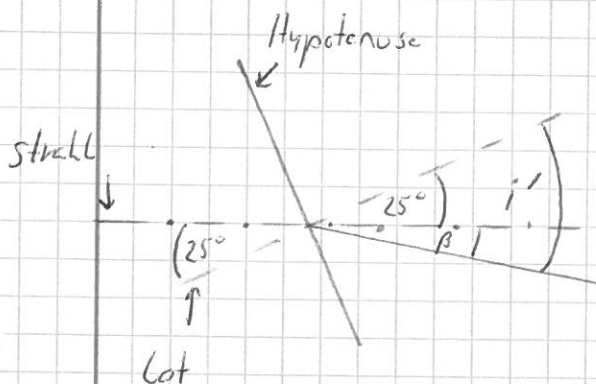
$n \cdot \sin i = n' \cdot \sin i'$

mit $\begin{cases} n_{\text{blau}} = 1,53 \\ n_2 = 1,51 \\ \sin i = 25^\circ \end{cases}$ $n' = 1$

$\Rightarrow i' = \arcsin \left(\frac{n}{n'} \cdot \sin i \right)$

$i'_{400} = \arcsin (1,53 \cdot \sin 25^\circ) = \cancel{39,34^\circ} 40,25^\circ$

$i'_{700} = 39,65^\circ$

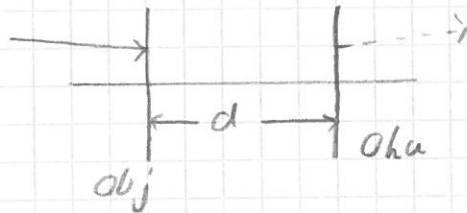


$\Rightarrow \beta = i' - 25^\circ$

$\beta_{400} = 15,29^\circ$

$\beta_{700} = 14,65^\circ$

Aufgabe 4:



$$\begin{pmatrix} y_2 \\ u_2 \end{pmatrix} = M \cdot \begin{pmatrix} y_1 \\ u_1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ u_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 5 \text{ mm} \\ 5^\circ \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 5 \text{ mm} \\ 0,087266 \end{pmatrix}$$

$$M = M_{oku} \cdot M_d \cdot M_{obj}$$

$$= \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1/50 \text{ mm} & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & -150 \text{ mm} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1/40 \text{ mm} & 1 \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} 1 & -150 \text{ mm} \\ 1/50 \text{ mm} & -2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1/40 \text{ mm} & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -2,75 & -150 \text{ mm} \\ -6/200 \text{ mm} & -2 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} y_2 \\ u_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -2,75 & -150 \text{ mm} \\ -6/200 \text{ mm} & -2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 5 \text{ mm} \\ 0,087266 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -26,84 \text{ mm} \\ -0,324532 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} y_2 \\ u_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -26,84 \text{ mm} \\ -18,59^\circ \end{pmatrix}$$

$$c) \quad T_{mick} = -\frac{t}{f'_{ckl}} \cdot T_{oku}$$

$$T_{oku} = \frac{250 \text{ mm}}{f'_{oku}} = \frac{250}{50} = 5$$

$$t = d - f'_{obj} - f'_{oku} = 150 \text{ mm} - 40 \text{ mm} - 50 \text{ mm} = 60 \text{ mm}$$

$$T_{mick} = -\frac{60 \text{ mm}}{40 \text{ mm}} \cdot 5 = -7,5$$

Aufgabe 5:

$$a) \quad E = h \cdot f = h \cdot \frac{c}{\lambda} = 3,61 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 2,245 \text{ eV}$$

$$\Phi_v = I_v \cdot d\Omega \quad \text{mit } d\Omega = 2\pi \cdot (1 - \cos \theta)$$

$$\begin{aligned} \Phi_v &= 25 \text{ cd} \cdot 2\pi \cdot \left(1 - \cos\left(\frac{5^\circ}{2}\right)\right) \text{ sr} \\ &= 0,1495 \text{ lm} \end{aligned}$$

$$\Phi_v = 683 \frac{\text{lm}}{\text{W}} \cdot V(\lambda) \cdot \Phi(\lambda)$$

$$\Rightarrow \Phi(\lambda) = \frac{\Phi_v(\lambda)}{683 \frac{\text{lm}}{\text{W}} \cdot V(\lambda)} = \frac{0,1495 \text{ lm}}{683 \frac{\text{lm}}{\text{W}} \cdot 1}$$

$$= 2,19 \cdot 10^{-4} \text{ W} \approx 0,22 \text{ mW}$$

$$b) \quad 0,5 I_0 = I_0 \cdot e^{-\alpha z} \quad \text{mit } z = 2 \text{ mm}$$

$$\Leftrightarrow 0,5 = e^{-\alpha z}$$

$$\ln(0,5) = -\alpha z \quad \Rightarrow \quad \alpha = -\frac{\ln(0,5)}{z}$$

$$\alpha = -0,3466 \frac{1}{\text{mm}}$$

c)

$$w(t) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{t}{t_0}\right)^2} \quad (\Rightarrow) \quad w(t)^2 = w_0^2 \cdot \left(1 + \left(\frac{t}{t_0}\right)^2\right)$$

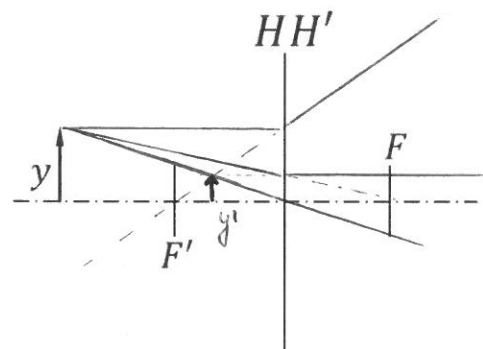
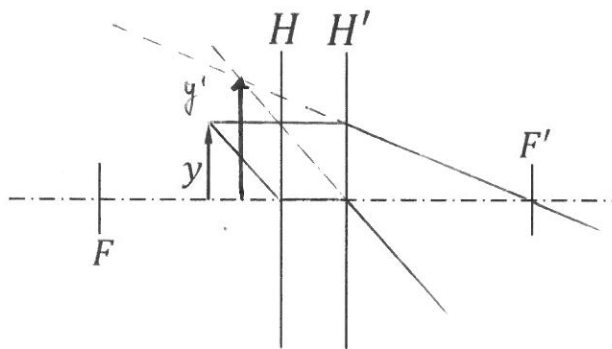
$$w_0^2 = \frac{w(t)^2}{\left(1 + \left(\frac{t}{t_0}\right)^2\right)} = \frac{0,1^2 \text{ m}^2}{\left(1 + \left(\frac{2000}{6}\right)^2\right)}$$

$$= \frac{0,01 \text{ m}^2}{111112,1}$$

$$w_0 = \sqrt{\frac{0,01 \text{ m}^2}{111112,1}} = 3 \cdot 10^{-4} \text{ m} = 0,3 \text{ mm}$$

Aufgabe III: Strahlkonstruktion (6 Punkte)

Konstruieren Sie die Bilder y' der beiden optischen Systeme.



Vorname:

Name:

Matrikelnummer:

Studiengang:

Aufgabe I: Fragen über Fragen (27P)

- a) Erklären Sie stichpunktartig ohne Formeln den Unterschied zwischen Aperturblende, Eintrittspupille und Austrittspupille? (2P)
- b) Was versteht man unter telezentrischem Strahlengang? (1P)
- c) Farblängsfehler (4P): Der Farblängsfehler hängt mit der Materialdispersion zusammen, welche durch die sogenannte Abbe-Zahl v beschrieben wird. Welche Abbe-Zahl würden Sie für eine positive Einzellinse auswählen um möglichst wenig Farblängsfehler zu bekommen? Mit zwei Linsenmaterialien (Abbe-Zahl unterschiedlich) können Sie einen (positiven) Achromaten konstruieren. Wie nennt man die Grundgleichung. Welches Material (große oder kleine Abbe-Zahl) wählen Sie für die positive Linse? Wie nennt man solch ein Glas?
- d) Bildfehler (2P): Nennen Sie einen „Bildformfehler“ und eine „Bildschärfefehler“.
- e) Was wird bei einer Katarakt-Operation gemacht? Welche typische Brechkraft hat eine künstliche Intraokularlinse (2P)
- f) Was versteht man unter EPI und TRANS-Beleuchtung in der Mikroskopie? Wie funktioniert Dunkelfeldbeleuchtung prinzipiell? (2P)
- g) Ein Mikroskop hat eine $NA=0.5$ und wird visuell eingesetzt. Macht hier eine Vergrößerung von 2000X noch Sinn, warum? (1P)
- h) Sie kaufen eine rote (633nm) und eine grüne (555nm) LED. Beide liefern genau 1W Lichtleistung. Wo würden Sie mehr LUMEN erwarten? Wieviel Lumen liefert die grüne LED? (2P)
- i) Ein Grundmode-Laser wird fokussiert. Skizzieren Sie den axialen Strahlengang im Fokusbereich und den Intensitätsverlauf im Laser-Querschnitt. Tragen Sie den Strahlradius und den Divergenzwinkel korrekt in die Skizzen ein. Wie hängen beide grundsätzlich zusammen? (4P)
- j) Skizzieren Sie grob das Absorptionsverhalten von wässrigem Gewebe für den Wellenlängenbereich von UV bis Infrarot. Bei welcher Wellenlänge (grob) ist die Eindringtiefe maximal? (2P)
- k) Sie beobachten „ideale“ Beugungsmuster an einem Spalt auf einem Schirm im Fernfeld. Was erwarten Sie (qualitativ) für die Lage und Sichtbarkeit der Beugungsmuster für diese Fälle im Vergleich:
- Enger Spalt im Vergleich zu breiterem Spalt (1P)
 - Spalt mit „Top-Hat“ (Kasten)-Intensitätsprofil und Spalt mit weichem Gauß-Intensitätsprofil (1P)
- l) Nennen Sie 3 medizinische Anwendungen von Lasern, welche sich in unterschiedlichen Intensitätsbereichen abspielen? (3P)

Aufgabe II: Beugung an optischen Datenträgern (9P)

Optische Datenträger speichern ihren Inhalt auf Spuren, die radial auf der Scheibe angeordnet sind. Um dem immer höher werdenden Bedarf an Speicherplatz gerecht zu werden, wurden im Laufe der Zeit immer mehr Bits pro Spur gespeichert und auch die Anzahl der Spuren, bei gleichem Platzbedarf, erhöht. Von der CD bis zur aktuellen BluRay stieg die Kapazität dabei von 700MB auf 27GB fast um den Faktor 40.

Die eng beieinander liegenden Spuren der CD schimmern in allen Farben des sichtbaren Spektrums, wenn sie mit weißem Licht beleuchtet wird. Dabei wirken die Spuren der CD als reflektierendes, optisches Beugungsgitter.

Im Folgenden sollen die einzelnen Datenträger als Reflexionsgitter (Gitterperiode = Spurbreite) betrachtet werden, wobei die Krümmung der Gitter nicht berücksichtigt werden soll.

- a) Eine CD wird von einem senkrecht einfallenden, grünen Laserstrahl der Wellenlänge **532 nm** beleuchtet. Im Abstand von **100 mm** wird das Beugungsmuster in Reflexion aufgenommen. Die +1te Beugungsordnung liegt auf dem Schirm im Abstand **d = 35,26 mm** vom Beleuchtungsstrahl entfernt. Wie breit sind die einzelnen Spuren der CD? (3P)
- b) Nun wird eine BluRay Disc ebenso beleuchtet. Die Spurbreite beträgt hier **0,32 μm**. Unter welchem Winkel findet man hier die erste Beugungsordnung? Kann man sie überhaupt sehen? Falls nicht, zeigen sie dies an Hand einer kurzen Rechnung. (2P)
- c) Ein CD Player nutzt zum Auslesen der Daten einen Laser der Wellenlänge **780 nm**. Dieser wird über eine Linse der numerischen Apertur **NA = 0,45** fokussiert. Wie groß ist die Rayleigh-Auflösung des Systems? Ist es damit möglich Daten einer BluRay Disc auszulesen? Warum (nicht)? (2P)
- d) Ein BluRay Spieler nutzt zum Auslesen der Daten einen blauen Laser der Wellenlänge **405 nm**. Wie groß muss die NA der fokussierenden Linse mindestens sein, um die Daten ohne Störungen durch benachbarte Spuren nach dem Rayleigh-Kriterium auflösen zu können? (1P)
- e) Die bei der BluRay Disc tatsächlich verwendete Numerische Apertur liegt bei **NA = 0.85**. Wie groß ist bei der Wellenlänge von **405 nm** die beugungsbegrenzte Schärfentiefe, wenn man davon ausgeht, dass die Linse im Vakuum bei **n = 1** fokussiert? (1P)

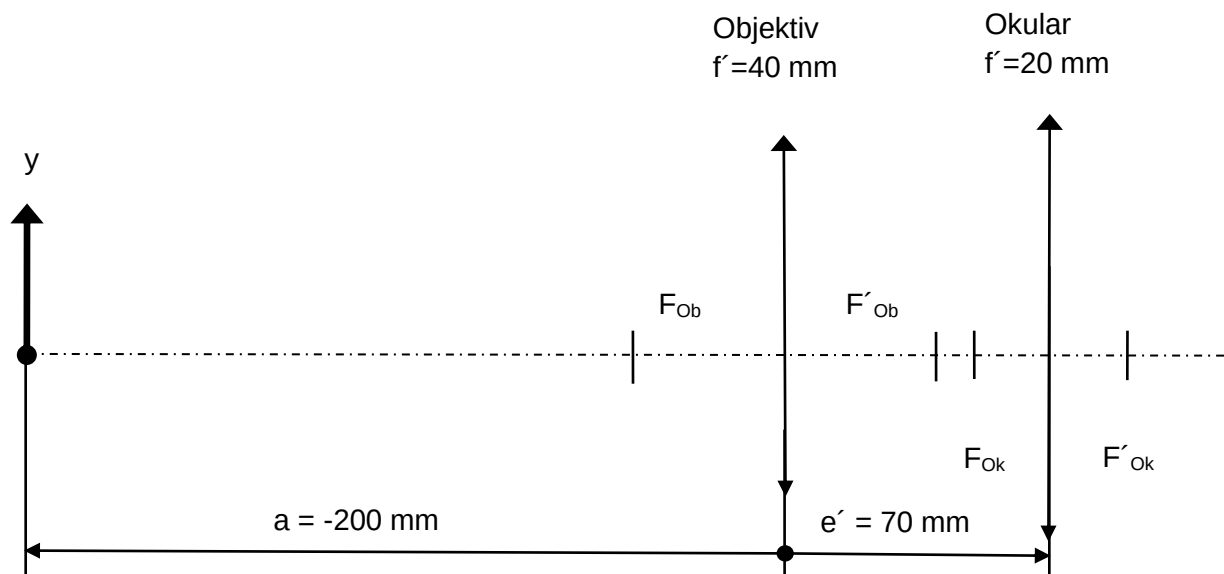
Aufgabe III: Fernrohrlupe (17P)

Für den Chirurgen ist zum einen eine optische Vergrößerung des Operationsbereichs zum anderen aber auch ein hinreichend großer Arbeitsabstand wichtig. Letzteres kann mit einer einfachen Lupe nicht erzielt werden, da bei Normalvergrößerung der Lupe der Abstand zum Objekt zu gering ist. Abhilfe schafft die sogenannte **Fernrohrlupe**. Im folgenden Rechenbeispiel basiert die Fernrohrlupe auf einem modifizierten Keplerfernrohr, bei dem das Fokussieren auf den Nahbereich durch einen etwas vergrößerten Abstand ($e' = 70\text{ mm}$) zwischen Objektiv ($f'_{\text{ob}} = 40\text{ mm}$) und Okular ($f'_{\text{ok}} = 20\text{ mm}$) ermöglicht wird. (Hinweis: Objektiv und Okular können als dünne Linsen betrachtet werden.)



Beispiel einer Fernrohrlupe an einem Brillengestell aus: www.heine.com

Die folgende Skizze im Maßstab 1:2 zeigt den grundsätzlichen Aufbau:



- Konstruieren Sie das Zwischenbild des Objektes y aus Parallel- und Brennpunktstrahl sowie den weiteren Strahlverlauf durch das Okular (4P).
- Wo befindet sich die Zwischenbildebene? Bitte auf der Skizze markieren. Welchen Winkel nehmen infolge Ihrer Konstruktion die Ausgangsstrahlen (nach dem Okular) gegen die optische Achse ein? (2P)

- c) Berechnen Sie nun die Lage und Größe des Zwischenbildes y' , wenn sich das Objekt 200 mm vor dem Objektiv befindet und dessen Größe 40 mm beträgt. (2P)
- d) Berechnen Sie den Winkel $\omega_{\text{mit-Instr}}$ der Ausgangsstrahlen (nach dem Okular) (1P)
- e) Wie groß ist die Vergrößerung der oben beschriebenen Fernrohrlupe, wenn der Sehwinkel ohne Instrument auch hier auf die deutliche Sehweite bezogen ist? (3P)
- f) Wie groß wäre die Unendlich-Vergrößerung des entsprechenden Kepler-Fernrohrs, bei der die bildseitige Brennebene des Objektivs F'_{ob} mit der objektseitigen Brennebene des Okulars F_{ok} zusammenfällt? (1P)

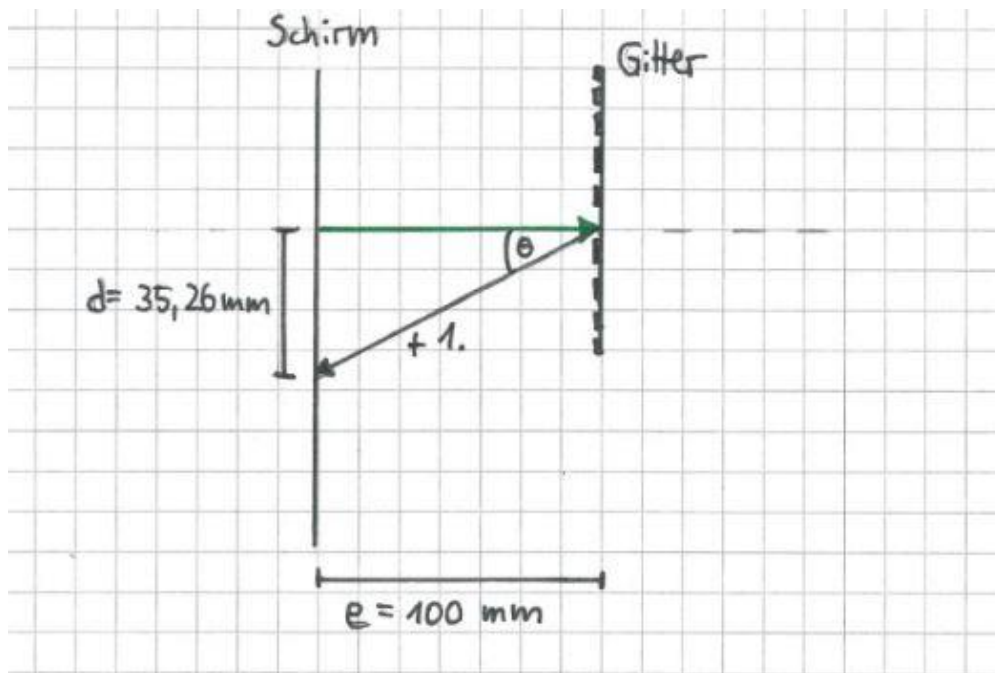
Die Fernrohrlupe soll nun als 2-Linsen-System mit einem Linsenabstand von 70 mm durchgerechnet werden.

- g) Wie groß ist die Gesamtbrennweite des Systems aus zwei Linsen? (2P)
- h) Wo liegt die Gesamthauptebene H' des Systems bezüglich Linse 2, also dem Okular? (2P)

Lösungen Klausur „Grundlagen der Optik“ 2017

Aufgabe 2:

a) Skizze:



$$\tan \theta_m = \frac{d}{e} \quad (2.1)$$

$$\theta_m = \arctan\left(\frac{d}{e}\right) \quad (2.2)$$

$$\sin \theta_m = \frac{m\lambda}{g} \quad (2.3)$$

$$g = \frac{m\lambda}{\sin \theta_m} \quad (2.4)$$

Einsetzen von 2.2 in 2.4:

$$g = \frac{m\lambda}{\sin\left(\arctan\left(\frac{d}{e}\right)\right)} = \frac{1 \cdot 532 \text{ nm}}{\sin\left(\arctan\left(\frac{35,26 \text{ mm}}{100 \text{ mm}}\right)\right)} \approx 1599,83 \text{ nm} \approx 1,6 \mu\text{m}$$

b) Einsetzen der Werte in 2.3:

$$\sin\theta_m = \frac{m\lambda}{g} = \frac{1 \cdot 532nm}{320nm} > 1$$

→ Für keinen Winkel nimmt die Sinusfunktion einen größeren Wert als 1 an, daher ist die Gleichung nicht lösbar, die 1. Beugungsordnung ist nicht sichtbar.

c)

$$\Delta x = 0,61 \frac{\lambda}{NA} \quad (2.5)$$

Einsetzen der Werte in 2.5:

$$\Delta x = 0,61 \frac{\lambda}{NA} = 0,61 \frac{780nm}{0,45} \approx 1057,3nm \approx 1,06\mu m > 0,32\mu m$$

Die Rayleigh Auflösung des Systems ist größer als die Periodenbreite der BluRay-Disc, daher beleuchtet der Laser immer mehrere Perioden gleichzeitig. Somit ist es nicht möglich, die Informationen, die sich in den einzelnen Perioden befinden, mit diesem System auszulesen.

d)

Größe der aufzulösenden Struktur: $\Delta x = 0,32\mu m = 320nm$

Umstellen von 2.5 nach NA:

$$NA = 0,61 \frac{\lambda}{\Delta x} = 0,61 \frac{405nm}{320nm} = 0,772$$

e)

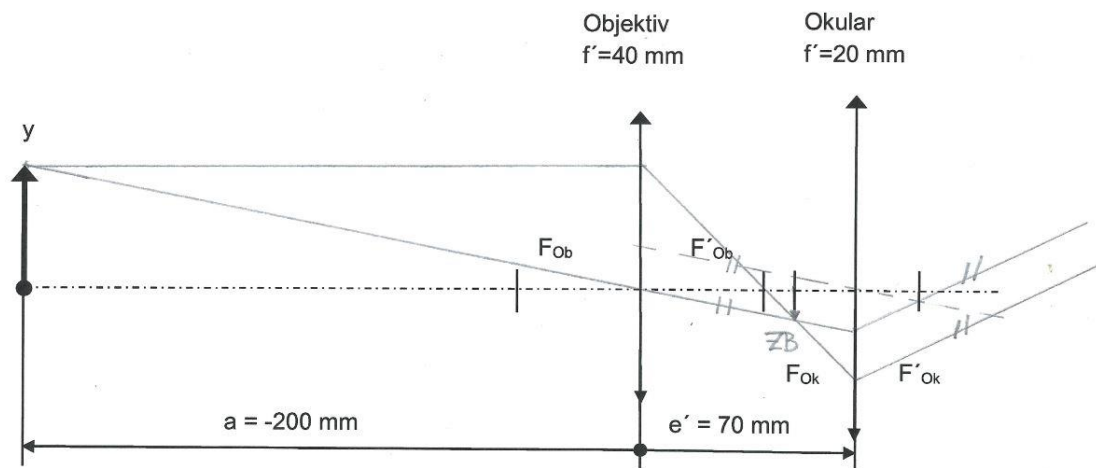
$$D_f = \frac{\delta_g}{2NA} = \frac{2\Delta x}{2NA} \quad (2.6)$$

Einsetzen von 2.5 in 2.6:

$$D_f = \frac{2 \cdot 0,61 \frac{\lambda}{NA}}{2NA} = \frac{0,61\lambda}{NA^2} = \frac{0,61 \cdot 405nm}{0,85^2} \approx 341,94nm$$

Aufgabe 3:

a)



b) Die Ausgangsstrahlen sind parallel zueinander (kollimiert), Lage vom Zwischenbild siehe a)

c)

$$\frac{1}{f'} = \frac{1}{a'} - \frac{1}{a} \quad (3.1)$$

$$y' = y \frac{a'}{a} \quad (3.2)$$

Umstellen von 3.1 nach a' , einsetzen von $f' = f'_{obj} = 40\text{mm}$ und $a = -200\text{mm}$

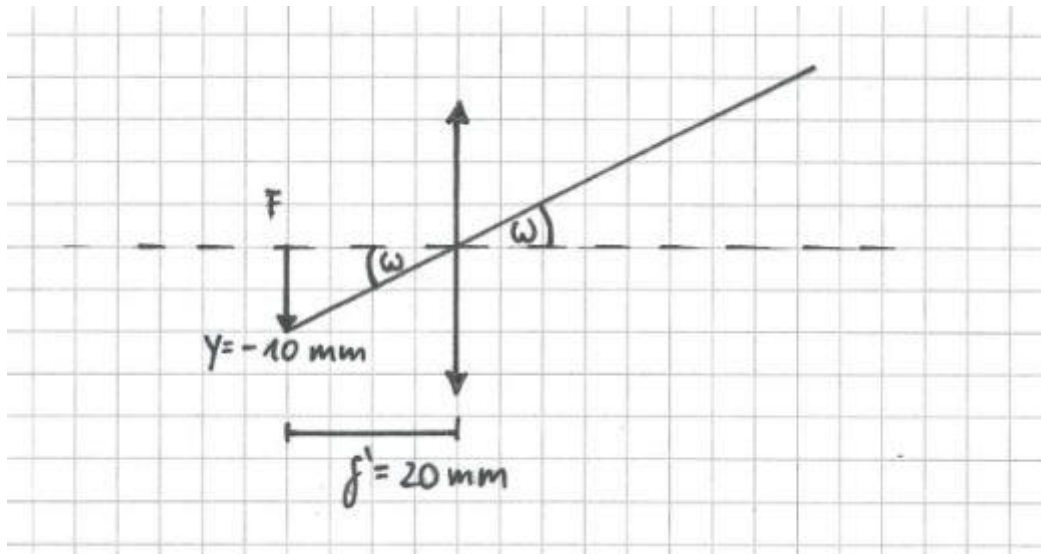
$$a' = \frac{f' \cdot a}{f' + a} = \frac{f'_{obj} \cdot a}{f'_{obj} + a} = \frac{40\text{mm} \cdot (-200\text{mm})}{40\text{mm} + (-200\text{mm})} = 50\text{mm}$$

Einsetzen der Werte in 3.2:

$$y' = y \frac{a'}{a} = 40\text{mm} \frac{50\text{mm}}{-200\text{mm}} = -10\text{mm}$$

Das Zwischenbild ist 10mm groß, liegt 50mm rechts von der Objektlinse und ist umgekehrt.

d) Skizze:



Aus der Skizze:

$$\tan \omega_{\text{mit-Inst}} = \frac{|y'|}{f'_{\text{oku}}}$$

$$\omega_{\text{mit-Inst}} = \arctan \frac{|y'|}{f'_{\text{oku}}} = \arctan \left(\frac{10\text{mm}}{20\text{mm}} \right) \approx 26,57^\circ$$

e)

$$\Gamma_{\text{Mikro}} = \beta' \cdot \frac{250\text{mm}}{f'_{\text{oku}}} = \frac{y'}{y} \cdot \frac{250\text{mm}}{f'_{\text{oku}}} = \frac{-10\text{mm}}{40\text{mm}} \cdot \frac{250\text{mm}}{20\text{mm}} = -3,125$$

Oder:

$$\Gamma_{\text{Mikro}} = \frac{-t}{f'_{\text{obj}}} \cdot \frac{250\text{mm}}{f'_{\text{oku}}} = \frac{-(70\text{mm} - 40\text{mm} - 20\text{mm})}{40\text{mm}} \cdot \frac{250\text{mm}}{20\text{mm}} = -3,125$$

f)

$$\Gamma_{\text{Kepler}} = -\frac{f'_{\text{obj}}}{f'_{\text{oku}}} = \frac{-40\text{mm}}{20\text{mm}} = -2$$

g)

$$\frac{1}{f'_{\text{ges}}} = \frac{1}{f'_{\text{obj}}} + \frac{1}{f'_{\text{oku}}} - \frac{e}{f'_{\text{obj}}f'_{\text{oku}}}$$

$$\frac{1}{f'_{\text{ges}}} = \frac{1}{40\text{mm}} + \frac{1}{20\text{mm}} - \frac{70\text{mm}}{40\text{mm} \cdot 20\text{mm}} = \frac{1}{-80\text{mm}}$$

$$f'_{\text{ges}} = -80\text{mm}$$

h)

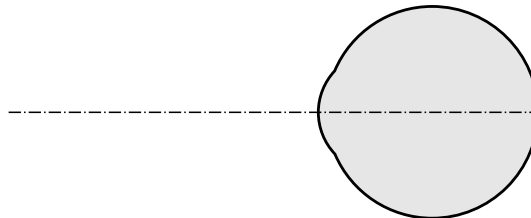
$$a'_{2H'} = -f'_{ges}\varphi_1 d = -f'_{ges} \frac{1}{f'_{obj}} d = -(-80mm) \frac{1}{40mm} 70mm = 140mm$$

Vorname: _____ Name: _____

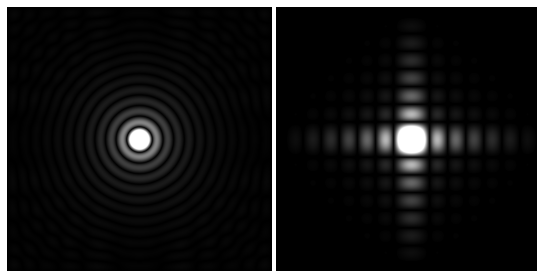
Matrikelnummer: _____ Studiengang: _____

Aufgabe 1: Fragen über Fragen**(18 Punkte)**

- a) Wie bezeichnet man die Bilder der physikalisch vorhandenen Aperturblende in einem optischen System? Wie bezeichnet man die Bilder der Feldblende? (2 Punkte)
- b) Es gibt verschieden Beschreibungsformen für optische Systeme, wie z.B. paraxiale Optik, geometrische Optik und Wellenoptik. Erläutern Sie kurz warum ein Objektpunkt nur gemäß der paraxialen Optik exakt in einen Bildpunkt abgebildet wird. Welche Näherungen/Effekte spielen beim Übergang zu geometrischer Optik und Wellenoptik eine Rolle? (2 Punkte)
- c) Warum bewirkt eine Lupe eine Vergrößerung? (1 Punkt)
- d) Auf einem Kamera-Objektiv finden Sie den Aufdruck 1.4/50. Was bedeuten diese Zahlen? (1 Punkt)
- e) Erklären Sie den Begriff „Vignettierung“. (1 Punkt)
- f) Nennen und beschreiben Sie einen Bildschärfefehler und geben Sie eine Korrekturmöglichkeit an. (3 Punkte)
- g) Skizzieren Sie den Strahlengang eines myopen Auges: (2 Punkte)



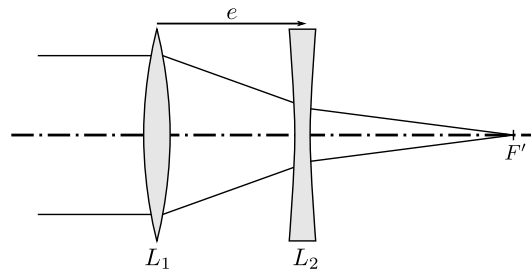
- h) Was bezeichnet der Begriff „Akkommodation“? (1 Punkt)
- i) Was ist der Unterschied zwischen einem Spektrometer und einem Monochromator? (1 Punkt)
- j) Für zwei unterschiedliche Systeme beobachten Sie die beiden unten dargestellten Intensitätsbilder in der Fourierebene. Skizzieren Sie die jeweiligen Blendenöffnungen. (2 Punkte)



- k) Kann die Leuchtdichte einer LED mithilfe eines optischen Systems erhöht werden? Begründen Sie Ihre Antwort. (2 Punkte)

Aufgabe 2: Zoom - System

(13 Punkte)



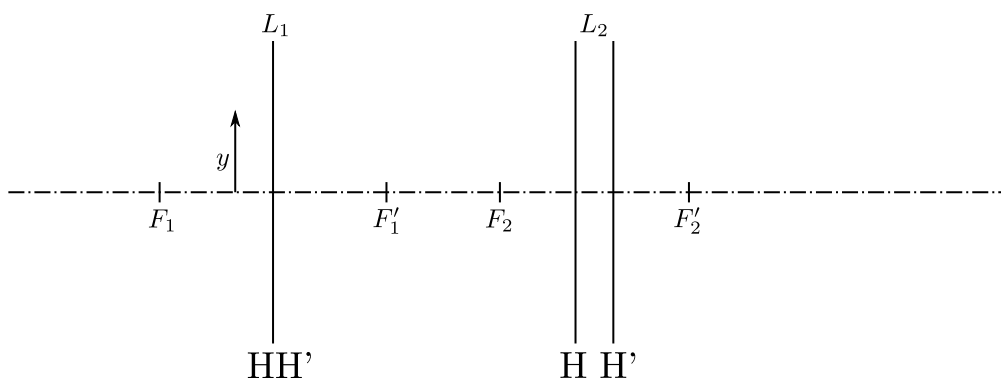
Zoom-Systeme werden in vielen unterschiedlichen Bereichen eingesetzt, u.a. in der Fotografie oder in Operationsmikroskopen. Ein einfaches Zoom-System kann mithilfe einer Sammel- und einer Zerstreuungslinse realisiert werden (s. Skizze).

Gegeben sei ein solches System mit einer Brennweite $f'_1 = 50 \text{ mm}$ für L_1 und einer Brennweite $f'_2 = -30 \text{ mm}$ für L_2 . Gehen Sie von dünnen Linsen aus.

- In welchem Abstand e müssen die Linsen zueinander positioniert werden, um eine Gesamtbrennweite von $f' = 200 \text{ mm}$ zu erhalten? (2 Punkte)
- Wo liegen die Hauptebenen H und H' des Systems? (2 Punkte)
- Ein CCD-Sensor wird in die Brennebene des Systems gestellt. Berechnen Sie die gesamte Baulänge von der Frontlinse L_1 bis zum Kamerachip. (1,5 Punkte)
- Die Fassung der Frontlinse L_1 dient hier als Aperturblende des Systems mit einem Durchmesser von 20 mm . Wo liegt die Austrittspupille und wie groß ist diese? (3 Punkte)
- Sie wollen nun eine Brennweite von $f' = 100 \text{ mm}$ einstellen, indem Sie die Linse L_2 verschieben. Um welche Strecke und in welche Richtung muss die Linse verschoben werden? (1,5 Punkte)
- Nun soll ein Objekt scharf auf den Chip abbilden. Durch die Verschiebung der Linse L_2 hat sich allerdings auch der Abstand zum Kamerachip geändert. Bestimmen Sie den nötigen Abstand von Objekt zur Frontlinse L_1 . (3 Punkte)
(Hinweis: Beachten Sie, dass sich auch die Lage der Hauptebenen geändert hat.)

Aufgabe 3: Konstruktion

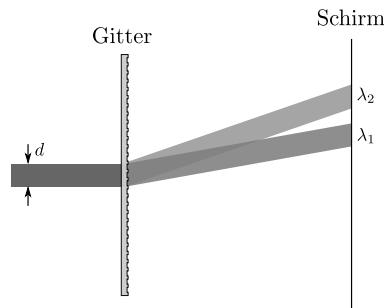
(6 Punkte)



- Konstruieren Sie die Abbildung des Objekts y durch Linse L_1 . (3 Punkte)
- Konstruieren Sie die Abbildung des Zwischenbildes durch Linse L_2 . (3 Punkte)

Aufgabe 4: Gitterspektrometer

(8 Punkte)



Mit einem Beugungsgitter mit einer Gitterkonstanten von 500 Linien/mm soll ein einfaches Spektrometer realisiert werden. Zunächst werden zwei Wellenlängen mit $\lambda_1 = 532 \text{ nm}$ und $\lambda_2 = 633 \text{ nm}$ verwendet, die in einem kollimierten Strahlbündel mit einem Durchmesser von $d = 5 \text{ mm}$ auf das Gitter geführt werden. Es wird nur die 1. Beugungsordnung betrachtet.

- Berechnen Sie die jeweiligen Beugungswinkel für die Wellenlängen λ_1 und λ_2 . (2 Punkte)
- Bestimmen Sie den Abstand des Schirms zum Gitter, bei dem die Spots (Lichtflecken) beider Wellenlängen getrennt voneinander wahrnehmbar sind. (3 Punkte)
- Es wird nun eine Linse mit einer Brennweite von $f' = 100 \text{ mm}$ direkt hinter dem Beugungsgitter positioniert und der Schirm in die Brennebene verschoben. Die Spots sollen nun einzeln betrachtet werden können, indem eine bewegliche Lochblende vor dem Schirm angebracht wird. Wie groß muss die Öffnung dieser Blende mindestens sein, sodass beide Spots noch vollständig sichtbar sind? (2 Punkte)
- Welches spektrale Auflösungsvermögen können Sie mit dem Aufbau erzielen? (1 Punkt)

Aufgabe 5: Beleuchtung und Fluoreszenz

(9 Punkte)

An ihrem Arbeitsplatz im Labor verwenden Sie eine LED-Glühbirne zur Beleuchtung. Diese hat einen Lichtstrom von $\Phi_V = 800 \text{ lm}$, der gleichmäßig in den Halbraum gestrahlt wird.

- Wie groß ist die Lichtstärke der Glühbirne? (1 Punkt)
- Berechnen Sie maximale Beleuchtungsstärke an Ihrem Arbeitsplatz, wenn sich die Glühbirne 1,5 m über dem Tisch befindet. (1 Punkt)

Sie untersuchen nun eine Probe mit Zellgewebe, das mit einem Fluoreszenz-Farbstoff präpariert wurde. Zur Anregung verwenden Sie eine LED mit einer Wellenlänge von $\lambda_{\text{LED}} = 425 \text{ nm}$ und einer optischen Ausgangsleistung von $P_{\text{opt}} = 16 \text{ mW}$.

- Wie groß ist die Energie eines Photons bei dieser Wellenlänge? (1 Punkt)
(Planck'sches Wirkumsquantum: $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$, Lichtgeschwindigkeit: $c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$)
- Es werden ungefähr 5 % der Anregungsphotonen in der Probe absorbiert, wobei mit jedem absorbierten Anregungsphoton ein Fluoreszenzphoton erzeugt wird. Wieviele Fluoreszenzphotonen werden pro Sekunde erzeugt? (2 Punkte)
- Die Fluoreszenzphotonen haben eine Wellenlänge von $\lambda_{\text{Fl}} = 528 \text{ nm}$. Berechnen Sie die Strahlungsleistung Φ_E der Fluoreszenz. (2 Punkte)
- Welcher Lichtstrom ergibt sich somit für die Fluoreszenz bei einem spektralen Helligkeitsempfinden von $V(528 \text{ nm}) = 0,8$? (2 Punkte)

Aufgabe 2: Zoom - System

(13 Punkte)

Geg.: $f'_1 = 50 \text{ mm}$; $f'_2 = -30 \text{ mm}$

a) Geg.: $f' = 200 \text{ mm}$

$$\frac{1}{f'} = \frac{1}{f'_1} + \frac{1}{f'_2} - \frac{e}{f'_1 \cdot f'_2}$$

$$\rightarrow e = f'_1 + f'_2 - \frac{f'_1 \cdot f'_2}{f'} = 50 \text{ mm} - 30 \text{ mm} - \frac{50 \text{ mm} \cdot (-30 \text{ mm})}{200 \text{ mm}} = \underline{\underline{27,5 \text{ mm}}}$$

b) $a_{1H} = \frac{f'}{f'_2} \cdot e = \frac{200 \text{ mm}}{-30 \text{ mm}} \cdot 27,5 \text{ mm} \approx \underline{\underline{-183,33 \text{ mm}}}$

$$a'_{2H'} = -\frac{f'}{f'_1} \cdot e = -\frac{200 \text{ mm}}{50 \text{ mm}} \cdot 27,5 \text{ mm} = \underline{\underline{-110 \text{ mm}}}$$

c) Abstand $\overline{L_1 L_2} = e = 27,5 \text{ mm}$

$$\text{Abstand } \overline{L_2 F'} = a'_{2H'} + f' = -110 \text{ mm} + 200 \text{ mm} = 90 \text{ mm}$$

$$\Rightarrow \text{Gesamte Baulänge: } \overline{L_1 L_2} + \overline{L_2 F'} = 27,5 \text{ mm} + 90 \text{ mm} = \underline{\underline{117,5 \text{ mm}}}$$

d) Geg.: $D_B = 20 \text{ mm}$

Lage der Austrittspupille:

$$a_{AP} = -e = -27,5 \text{ mm} \rightarrow \frac{1}{a'_{AP}} - \frac{1}{a_{AP}} = \frac{1}{f'_2}$$

$$\Rightarrow a'_{AP} = \frac{a_{AP} \cdot f'_2}{a_{AP} + f'_2} = \frac{-27,5 \text{ mm} \cdot (-30 \text{ mm})}{-27,5 \text{ mm} - 30 \text{ mm}} \approx \underline{\underline{-14,35 \text{ mm}}}$$

Größe der Austrittspupille:

$$D_{AP} = |\beta'| \cdot D_B = \left| \frac{a'_{AP}}{a_{AP}} \right| \cdot D_B = \left| \frac{a'_{AP}}{a_{AP}} \right| \cdot D_B = \left| \frac{-14,35 \text{ mm}}{-27,5 \text{ mm}} \right| \cdot 20 \text{ mm} \approx \underline{\underline{10,43 \text{ mm}}}$$

e) Geg.: $f' = 100 \text{ mm}$

$$e_{\text{neu}} = f'_1 + f'_2 - \frac{f'_1 \cdot f'_2}{f'} = 50 \text{ mm} - 30 \text{ mm} - \frac{50 \text{ mm} \cdot (-30 \text{ mm})}{100 \text{ mm}} = 35 \text{ mm}$$

$$\Rightarrow \text{Linse } L_2 \text{ muss um } 35 \text{ mm} - 27,5 \text{ mm} = \underline{\underline{7,5 \text{ mm}}} \text{ nach rechts verschoben werden.}$$

f) Abstand L_2 zum Chip: $90 \text{ mm} - 7,5 \text{ mm} = 82,5 \text{ mm}$

Hauptebenen:

$$a_{1H} = \frac{f'}{f'_2} \cdot e = \frac{100 \text{ mm}}{-30 \text{ mm}} \cdot 35 \text{ mm} \approx -116,67 \text{ mm}$$

$$a'_{2H'} = -\frac{f'}{f'_1} \cdot e = -\frac{100 \text{ mm}}{50 \text{ mm}} \cdot 35 \text{ mm} = -70 \text{ mm}$$

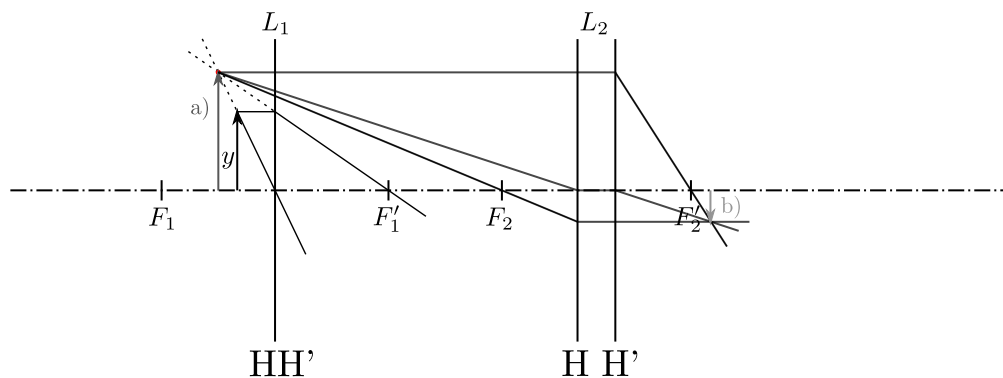
$$\text{Bildabstand: } a' = 82,5 \text{ mm} - a'_{2H'} = 82,5 \text{ mm} + 70 \text{ mm} = 152,5 \text{ mm}$$

$$\rightarrow \frac{1}{a'} - \frac{1}{a} = \frac{1}{f'} \rightarrow a = \frac{a' \cdot f'}{f' - a'} = \frac{152,5 \text{ mm} \cdot 100 \text{ mm}}{100 \text{ mm} - 152,5 \text{ mm}} \approx -290,48 \text{ mm}$$

$$\text{Abstand von Objekt zu } L_1: a - a_{1H} = -290,48 \text{ mm} - 116,67 \text{ mm} = \underline{\underline{-407,15 \text{ mm}}}$$

Aufgabe 3: Konstruktion

(6 Punkte)



Aufgabe 4: Gitterspektrometer

(8 Punkte)

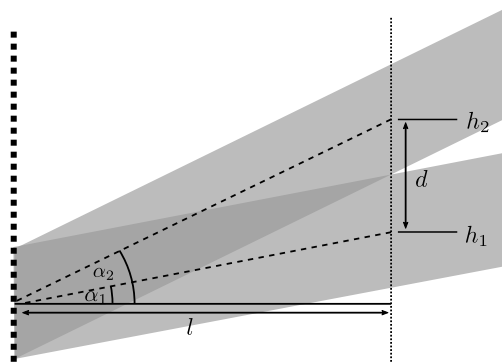
Geg.: $g = (500 \frac{1}{\text{mm}})^{-1} = 2 \mu\text{m}$; $\lambda_1 = 532 \text{ nm}$; $\lambda_2 = 633 \text{ nm}$; $d = 5 \text{ mm}$; $m = 1$

a) Für die erste Beugungsordnung ($m = 1$) gilt: $\sin \alpha = \frac{\lambda}{g} \rightarrow \alpha = \arcsin\left(\frac{\lambda}{g}\right)$

$$\lambda_1: \alpha_1 = \arcsin\left(\frac{\lambda_1}{g}\right) = \arcsin\left(\frac{532 \text{ nm}}{2 \mu\text{m}}\right) \approx \underline{\underline{15,43^\circ}}$$

$$\lambda_2: \alpha_2 = \arcsin\left(\frac{\lambda_2}{g}\right) = \arcsin\left(\frac{633 \text{ nm}}{2 \mu\text{m}}\right) \approx \underline{\underline{18,45^\circ}}$$

b) Skizze:



$$h_2 - h_1 = d$$

$$l \cdot \tan \alpha_2 - l \cdot \tan \alpha_1 = d$$

$$\Rightarrow l = \frac{d}{\tan \alpha_2 - \tan \alpha_1} = \frac{5 \text{ mm}}{\tan(18,45^\circ) - \tan(15,43^\circ)} \approx \underline{\underline{86,78 \text{ mm}}}$$

c) Spotgröße im Fokus entspricht dem Airy-Durchmesser (beugungsbegrenzte Abbildung). Die Blendenöffnung muss daher mindestens so groß wie das größere Beugungsscheibchen sein.

$$D_{\text{Airy}} \sim \lambda \Rightarrow D_{\text{Blende, min}} = D_{\text{Airy}}(\lambda_2) = 1,22 \cdot \frac{\lambda_2}{\text{NA}}$$

$$\text{NA} = \frac{d}{2f'} = \frac{5 \text{ mm}}{2 \cdot 100 \text{ mm}} = 0,025$$

$$\Rightarrow D_{\text{Blende, min}} = 1,22 \cdot \frac{633 \text{ nm}}{0,025} \approx \underline{\underline{30,89 \mu\text{m}}}$$

d) $A = \frac{m \cdot d}{g} = \frac{1 \cdot 5 \text{ mm}}{2 \mu\text{m}} = \underline{\underline{2500}}$

Aufgabe 5: Beleuchtung und Fluoreszenz**(9 Punkte)**Geg.: $\Phi_V = 800 \text{ lm}$; $\Omega = 2\pi \text{ sr}$

a) $I_V = \frac{\Phi_V}{\Omega} = \frac{800 \text{ lm}}{2\pi \text{ sr}} \approx \underline{\underline{127,32 \text{ cd}}}$

b) Geg.: $r = 1,5 \text{ m}$

$$E_V = \frac{I}{r^2} \text{ sr} = \frac{127,32 \text{ cd}}{(1,5 \text{ m})^2} \text{ sr} \approx \underline{\underline{56,59 \text{ lx}}}$$

c) Geg.: $\lambda_{\text{LED}} = 425 \text{ nm}$

$$E_{\text{Phot}} = h \cdot \frac{c}{\lambda_{\text{LED}}} = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot \frac{3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{425 \text{ nm}} \approx \underline{\underline{4,68 \cdot 10^{-19} \text{ J}}}$$

d) Geg.: $P_{\text{opt}} = 16 \text{ mW}$

$$N_{\text{Phot, Anr}} = \frac{P_{\text{opt}}}{E_{\text{Phot}}} = \frac{16 \text{ mW}}{4,68 \cdot 10^{-19} \text{ J}} \approx 3,42 \cdot 10^{16} \text{ s}^{-1}$$

$$\Rightarrow N_{\text{Phot, Fl}} = 0,05 \cdot N_{\text{Phot, Anr}} = 0,05 \cdot \approx 3,42 \cdot 10^{16} \text{ s}^{-1} \approx \underline{\underline{1,71 \cdot 10^{15} \text{ s}^{-1}}}$$

e) Geg.: $\lambda_{\text{FL}} = 528 \text{ nm}$

$$\Phi_E = N_{\text{Phot, Fl}} \cdot E_{\text{Phot, Fl}} = N_{\text{Phot, Fl}} \cdot \frac{h \cdot c}{\lambda_{\text{Fl}}} = 1,71 \cdot 10^{15} \text{ s}^{-1} \cdot 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot \frac{3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{528 \text{ nm}} \approx \underline{\underline{643,78 \mu\text{W}}}$$

f) Geg.: $V(528 \text{ nm}) = 0,8$

$$\Phi_V = 683 \frac{\text{lm}}{\text{W}} \cdot V(528 \text{ nm}) \cdot \Phi_E = 683 \frac{\text{lm}}{\text{W}} \cdot 0,8 \cdot 643,78 \mu\text{W} \approx \underline{\underline{0,35 \text{ lm}}}$$

Vorname: _____ Name: _____

Matrikelnummer: _____ Studiengang: _____

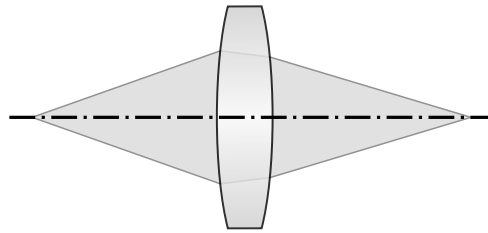
Aufgabe 1: Fragen über Fragen

(18 Punkte)

- a) Was ist der Unterschied zwischen Abbildungsmaßstab und Vergrößerung? (2 Punkte)
- b) Durch welche 5 Eigenschaften kann eine elektromagnetische Welle beschrieben werden? (2,5 Punkte)
- c) Was beschreibt der Begriff „Dispersion“? (1 Punkt)
- d) Was ist der Unterschied zwischen Ein-/Austrittspupille und Aperturblende? (1 Punkt)
- e) Erklären Sie den Unterschied zwischen einem reellen und einem virtuellem Bild. (2 Punkte)
- f) Was versteht man unter Refraktionsfehler in der Augenheilkunde? Nennen Sie 2 verschiedene Typen mit Fachbegriff. (3 Punkte)
- g) Welche Vorteile erhält man durch Immersion in der Mikroskopie? (1,5 Punkte)
- h) Auf einem Mikroskopobjektiv steht $60\times/0.70$. Was bedeuteten die beiden Zahlen? (2 Punkte)
- i) Rotes und blaues Licht fällt jeweils auf ein Prisma und ein Gitter. Welches Licht wird jeweils stärker abgelenkt? (1 Punkt)
- j) Nennen Sie 2 medizinische Anwendungen von Lasern, welche sich in unterschiedlichen Intensitätsbereichen abspielen. (2 Punkte)

Aufgabe 2: Einzellinse

(12 Punkte)

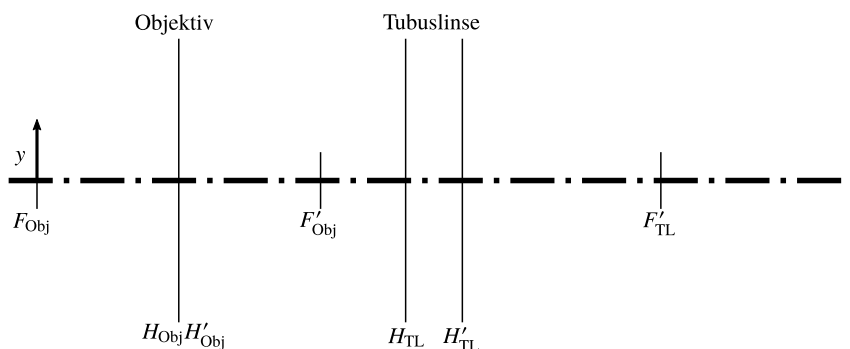


Für einen Versuchsaufbau soll eine Einzellinse ausgelegt werden. Die Brennweite dieser Linse ist mit $f' = 100 \text{ mm}$ vorgegeben.

- Das abzubildende Objekt befindet sich in einem Abstand von 300 mm vor der Linse und hat eine Höhe von 20 mm. Berechnen Sie die Lage und Größe des Bildes. Gehen Sie zunächst von einer dünnen Linse aus. (3 Punkte)
- Berechnen Sie die Radien r_1 und r_2 für den Fall einer dünnen bikonvexen Linse. Der Brechungsindex des Glases beträgt $n_d = 1,5185$. (2 Punkte)
- Wie ändert sich die Brennweite, wenn nun eine dicke Linse mit einer Dicke von 8 mm angenommen wird? Die Radien der Linse sowie der Brechungsindex bleiben gleich. (1 Punkt)
- Wo liegen die Hauptebenen der dicken Linse? (2 Punkte)
- Die chromatische Variation der dicken Linse beträgt 0,15 dpt. Welche Abbe-Zahl hat das Glas? (1 Punkt)
- Eine Einzellinse mit der Brennweite $f'_1 = 100 \text{ mm}$ soll nun mit einer Zerstreuungslinse verkittet werden, um einen Achromaten zu bauen. Die Brennweite des Achromaten soll $f'_{\text{ges}} = 150 \text{ mm}$ betragen. Bestimmen Sie die Abbe-Zahl ν_2 der zusätzlichen Linse, wenn die Abbe-Zahl der ersten Linse $\nu_1 = 64$ ist. (3 Punkte)

Aufgabe 3: Mikroskop mit Immersion

(14 Punkte)



Ein Digitalmikroskop bestehe aus einem Objektiv und einer Tubuslinse. Die Brennweite der Tubuslinse beträgt $f'_{\text{TL}} = 160 \text{ mm}$ und der Abbildungsmaßstab ist mit $\beta' = -40$ gegeben. Der Durchmesser des Objektivs beträgt 5 mm und stellt die begrenzende Apertur dar.

- Konstruieren Sie das Zwischenbild y' in der obigen Abbildung. (6 Punkte)
- Bestimmen Sie die Brennweite des Objektivs. (1 Punkt)

Fortsetzung auf nächster Seite!!!

- c) Das Objektiv wird nun in Wasser eingetaucht ($n = 1,33$). Wie verändert sich die objektseitige Brennweite des Objektivs und wie groß ist dann der objektseitige Öffnungswinkel? (3 Punkte)
- d) Welche Auflösung wird bei der Wasserimmersion erzielt, wenn die Wellenlänge $\lambda = 532 \text{ nm}$ beträgt? (2 Punkte)
- e) Es soll nun zusätzlich ein Okular eingebaut werden. Berechnen Sie die nötige Brennweite des Okulars, wenn die Gesamtvergrößerung Γ des Mikroskops $400\times$ sein soll. (2 Punkte)

Aufgabe 4: Nd:YAG - Laser

(10 Punkte)

Ein Nd:YAG - Laser emittiert einen idealen gaußschen Strahl (TEM_{00}) mit einer Wellenlänge von $\lambda = 1064 \text{ nm}$. Der Radius der Strahltaile soll $w_0 = 0,8 \text{ mm}$ betragen, wobei dort eine maximale Intensität $I_0 = 6 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ gemessen wurde.

- a) Welchen Durchmesser besitzt der Strahl in einer Entfernung von 2 m ? (2 Punkte)
- b) Berechnen Sie die Divergenz des Lasers. (1 Punkt)
- c) Wie groß ist die Intensität auf der optischen Achse im Abstand der Rayleigh-Länge z_R zur Strahltaile und wie groß ist sie im Abstand 2 m ? (2 Punkte)
- d) Berechnen Sie die Energie eines Photons und wieviele Photonen auf der optischen Achse im Abstand 2 m pro Sekunde und pro Quadratmeter auftreffen (Photonenflussdichte). (2 Punkte)
Planck'sches Wirkungsquantum: $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$, Lichtgeschwindigkeit: $c_0 = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
- e) Das Spektrum des Lasers soll nun untersucht werden. Dazu steht Ihnen ein Beugungsgitter mit einer Gitterperiode $d = 3 \mu\text{m}$ sowie ein Kamerasensor mit einem Pixelabstand von $10 \mu\text{m}$ zur Verfügung. Zeigen Sie anhand einer Rechnung, ob eine Auflösung von $0,1 \text{ nm}$ erreicht wird, wenn die 2. Beugungsordnung ($m = 2$) genutzt wird und sich der Kamerasensor in einem Abstand von 100 mm vom Gitter befindet. (3 Punkte)

Hinweis: Untersuchen Sie, wo die spektralen Komponenten von 1064 nm und $1064,1 \text{ nm}$ auf dem Sensor auftreffen.

Aufgabe 2: Einzellinse

(12 Punkte)

Geg.: $f' = 100 \text{ mm}$

- a)
- Geg.:
- $a = -300 \text{ mm}$
- ;
- $y = 20 \text{ mm}$

Lage des Bildes:

$$\frac{1}{a'} - \frac{1}{a} = \frac{1}{f'} \rightarrow a' = \frac{f' \cdot a}{f' + a} = \frac{100 \text{ mm} \cdot (-300 \text{ mm})}{100 \text{ mm} - 300 \text{ mm}} = \underline{\underline{150 \text{ mm}}}$$

Größe des Bildes:

$$y' = \beta' \cdot y = \frac{a'}{a} \cdot y = \frac{150 \text{ mm}}{-300 \text{ mm}} \cdot 20 \text{ mm} = \underline{\underline{-10 \text{ mm}}}$$

- b)
- Geg.:
- $n_d = 1,5185$
- ;
- $r_1 = -r_2$
- (bikonvexe Linse)

$$\frac{1}{f'} = (n_d - 1) \cdot \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) = (n_d - 1) \cdot \frac{2}{r_1}$$

$$\Rightarrow r_1 = 2 \cdot f' \cdot (n_d - 1) = 2 \cdot 100 \text{ mm} \cdot (1,5185 - 1) \approx 103,7 \text{ mm}$$

$$\Rightarrow r_2 = -103,7 \text{ mm}$$

- c)
- Geg.:
- $d = 8 \text{ mm}$

$$\frac{1}{f'_{\text{neu}}} = (n_d - 1) \cdot \frac{2}{r_1} - \frac{d \cdot (n_d - 1)^2}{n_d \cdot r_1^2}$$

$$\rightarrow f'_{\text{neu}} = \left[(n_d - 1) \cdot \frac{2}{r_1} - \frac{d \cdot (n_d - 1)^2}{n_d \cdot r_1^2} \right]^{-1} = \left[(1,5185 - 1) \cdot \frac{2}{103,7 \text{ mm}} - \frac{8 \text{ mm} \cdot (1,5185 - 1)^2}{1,5185 \cdot (103,7 \text{ mm})^2} \right]^{-1} \approx \underline{\underline{101,335 \text{ mm}}}$$

- d)
- $a_{1H} = f'_{\text{neu}} \cdot \varphi_2 \cdot \frac{d}{n_d} = f' \cdot \frac{n_d - 1}{r_2} \cdot \frac{d}{n_d} = 101,335 \text{ mm} \cdot \frac{1 - 1,5185}{-103,7 \text{ mm}} \cdot \frac{8 \text{ mm}}{1,5185} \approx \underline{\underline{2,67 \text{ mm}}}$

$$a'_{2H} = -f'_{\text{neu}} \cdot \varphi_1 \cdot \frac{d}{n_d} = -101,335 \text{ mm} \cdot \frac{1,5185 - 1}{103,7 \text{ mm}} \cdot \frac{8 \text{ mm}}{1,5185} \approx \underline{\underline{-2,67 \text{ mm}}}$$

- e)
- Geg.:
- $\Delta\varphi = 0,15 \text{ dpt}$

$$\varphi = \frac{1}{f'_{\text{neu}}} = \frac{1}{101,335 \text{ mm}} \approx 9,87 \text{ dpt}$$

$$\rightarrow \Delta\varphi = \frac{\varphi_d}{\nu} \rightarrow \nu = \frac{\varphi_d}{\Delta\varphi} \approx \underline{\underline{65,8}}$$

- f)
- Geg.:
- $f'_1 = 100 \text{ mm}$
- ;
- $f'_{\text{ges}} = 150 \text{ mm}$
- ;
- $\nu_1 = 64$

$$\frac{1}{f'_{\text{ges}}} = \frac{1}{f'_1} + \frac{1}{f'_2} \rightarrow \frac{1}{f'_2} = \frac{1}{f'_{\text{ges}}} - \frac{1}{f'_1}$$

$$\Rightarrow f'_2 = \left[\frac{1}{f'_{\text{ges}}} - \frac{1}{f'_1} \right]^{-1} = \left[\frac{1}{150 \text{ mm}} - \frac{1}{100 \text{ mm}} \right]^{-1} = -300 \text{ mm}$$

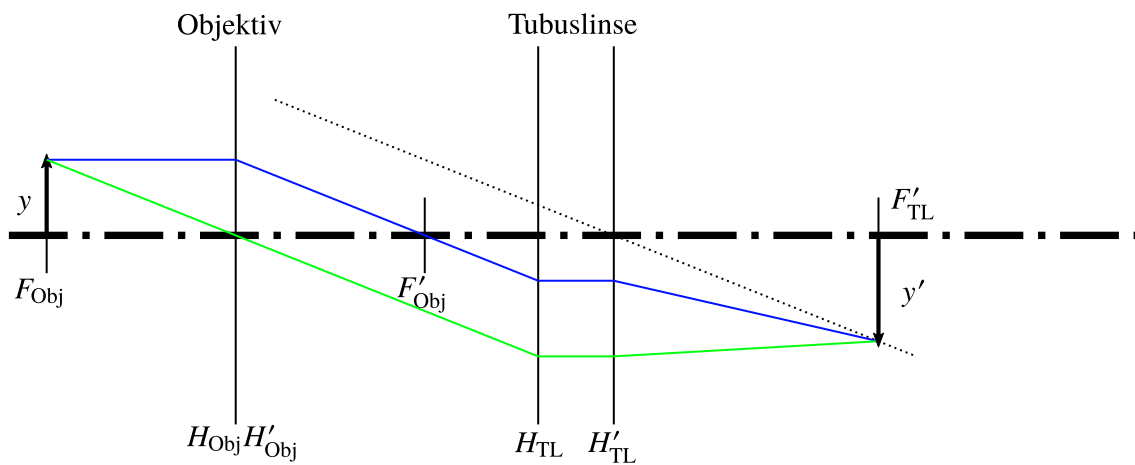
$$\text{Achromasie-Bedingung: } \frac{\varphi_1}{\nu_1} + \frac{\varphi_2}{\nu_2} = 0$$

$$\Rightarrow \nu_2 = -\varphi_2 \cdot \frac{\nu_1}{\varphi_1} = -\frac{1}{-300 \text{ mm}} \cdot \frac{64}{1/100 \text{ mm}} \approx \underline{\underline{21,33}}$$

Aufgabe 3: Mikroskop mit Immersion

(14 Punkte)

a)

b) Geg.: $f'_{TL} = 160 \text{ mm}$; $\beta' = -40$

$$\beta' = -\frac{f'_{TL}}{f'_{Obj}} \rightarrow f'_{Obj} = -\frac{f'_{TL}}{\beta'} = \frac{-160 \text{ mm}}{-40} = \underline{\underline{4 \text{ mm}}}$$

c) Geg.: $n = 1,33$; $d_{Obj} = 5 \text{ mm}$

$$\text{Neue objektseitige Brennweite: } f_{Obj, \text{ neu}} = n \cdot f_{Obj} = 1,33 \cdot (-4 \text{ mm}) = \underline{\underline{-5,32 \text{ mm}}}$$

Objektseitiger Öffnungswinkel:

$$\tan \sigma = \frac{d_{Obj}/2}{|f_{Obj}|} \Rightarrow \sigma = \arctan \left(\frac{2,5 \text{ mm}}{5,32 \text{ mm}} \right) \approx \underline{\underline{25,17^\circ}}$$

d) Geg.: $\lambda = 532 \text{ nm}$

$$NA = n \cdot \sin \sigma = 1,33 \cdot \sin(25,17^\circ) \approx 0,57$$

$$\rightarrow \Delta x = 0,61 \cdot \frac{\lambda}{NA} = 0,61 \cdot \frac{532 \text{ nm}}{0,57} \approx \underline{\underline{569,33 \text{ nm}}}$$

e) Geg.: $\Gamma_{\text{ges}} = -400$

$$\Gamma_{\text{ges}} = \beta' \cdot \frac{250 \text{ mm}}{f'_{Oku}} \Rightarrow f'_{Oku} = \frac{\beta' \cdot 250 \text{ mm}}{\Gamma_{\text{ges}}} = \underline{\underline{25 \text{ mm}}}$$

Aufgabe 4: Nd:YAG - Laser

(10 Punkte)

Geg.: $\lambda = 1064 \text{ nm}$; $w_0 = 0,8 \text{ mm}$; $I_0 = 6 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$

$$\text{a) } z_R = \frac{\pi \cdot w_0^2}{\lambda} = \frac{\pi \cdot (0,8 \text{ mm})^2}{1064 \text{ nm}} \approx 1,89 \text{ m}$$

$$w(2 \text{ m}) = w_0 \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{2 \text{ m}}{z_R}\right)^2} = 0,8 \text{ mm} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{2 \text{ m}}{1,89 \text{ m}}\right)^2} \approx \underline{\underline{1,16 \text{ mm}}}$$

$$\text{b) } \Theta = \frac{\lambda}{\pi \cdot w_0} = \frac{w_0}{z_R} = \frac{0,8 \text{ mm}}{1,89 \text{ m}} \approx \underline{\underline{0,42 \text{ mrad}}}$$

$$\text{c) } I(z_R) = I_0 \cdot \left(\frac{w_0}{w(z)}\right)^2 = I_0 \cdot \left(\frac{w_0}{w_0 \sqrt{2}}\right)^2 = \frac{I_0}{2} \approx \underline{\underline{3 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}}}$$

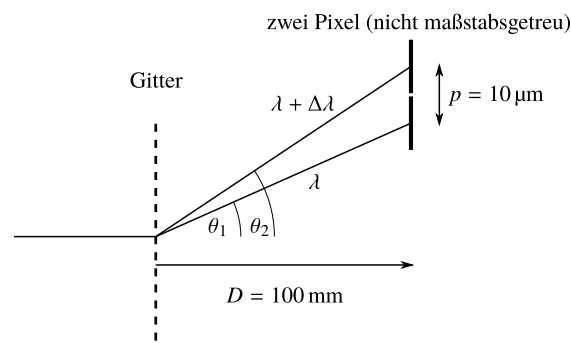
$$I(z = 2 \text{ m}) = I_0 \cdot \left(\frac{w_0}{w(2 \text{ m})}\right)^2 = I_0 \cdot \left(\frac{0,8 \text{ mm}}{1,16 \text{ mm}}\right)^2 \approx \underline{\underline{2,85 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}}}$$

$$\text{d) Energie eines Photons: } E_{\text{Phot}} = \frac{h \cdot c_0}{\lambda} = \frac{6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J s} \cdot 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{1064 \cdot 10^{-9} \text{ m}} \approx \underline{\underline{1,87 \cdot 10^{-19} \text{ J}}}$$

$$\text{Photonenflussdichte im Abstand 2 m: } \Phi_{\text{Phot}} = \frac{I(z=2 \text{ m})}{E_{\text{Phot}}} = \frac{2,85 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}}{1,87 \cdot 10^{-19} \text{ J}} \approx \underline{\underline{1,52 \cdot 10^{19} \frac{[\text{Photonen}]}{\text{m}^2 \text{ s}}}}$$

$$\text{e) } \underline{\text{Geg.:}} \quad g = 3 \mu\text{m} ; p = 10 \mu\text{m} ; \Delta\lambda = 0,1 \text{ nm} ; m = 2 ; D = 100 \text{ mm} ; \lambda = 1064 \text{ nm}$$

Skizze:

Mit $\sin \theta_m = \frac{m \cdot \lambda}{g}$:

$$\sin \theta_1 = 2 \cdot \frac{1064 \text{ nm}}{3 \mu\text{m}} \Rightarrow \theta_1 \approx 45,1807^\circ$$

$$\sin \theta_2 = 2 \cdot \frac{1064,1 \text{ nm}}{3 \mu\text{m}} \Rightarrow \theta_2 \approx 45,1861^\circ$$

$$\rightarrow d_1 = D \cdot \tan \theta_1 = 100 \text{ mm} \cdot \tan(45,1807^\circ) \approx 100,6328 \text{ mm}$$

$$\rightarrow d_2 = D \cdot \tan \theta_2 = 100 \text{ mm} \cdot \tan(45,1861^\circ) \approx 100,6517 \text{ mm}$$

$$\text{Abstand auf Sensor: } d_2 - d_1 = 100,6517 \text{ mm} - 100,6328 \text{ mm} = \underline{\underline{18,9 \mu\text{m} > p}}$$

 $\Rightarrow$ Eine Auflösung von 0,1 nm ist gewährleistet.

Vorname: _____ Name: _____

Matrikelnummer: _____ Studiengang: _____

Aufgabe 1: Fragen über Fragen

(18 Punkte)

- a) Nennen sie zwei Wechselwirkungsprozesse von Licht und Materie. (1 Punkt)
- b) Welche Voraussetzungen sind für das Auftreten von Totalreflexion notwendig? (1 Punkt)
- c) Worauf beschränkt sich der Gültigkeitsbereich der paraxialen Optik und was kann beobachtet werden, wenn dieser verlassen wird? (2 Punkte)
- d) Erklären Sie stichpunktartig den Begriff „Zoom“. (2 Punkte)
- e) Nennen Sie 3 Parameter, die sich über die Blendenöffnung beeinflussen lassen können. (1,5 Punkte)
- f) Welche beiden Komponenten liefern den Großteil der Gesamtbrechkraft im Auge und wie groß ist diese in etwa? Was ist das typische Auflösungsvermögen eines gesunden Auges? (2 Punkte)
- g) Auf einem Mikroskop-Objektiv ist die Kennzeichnung „ $50\times / 0.8$ “ aufgedruckt. Was bedeuten diese Zahlen und welche Gesamtvergrößerung ist hier noch sinnvoll? (2 Punkte)
- h) Zwischen Orts- und Winkelraum besteht in der Optik eine Beziehung über die Fourier-Transformation. Welche Winkelverteilung (Skizze o. Funktion) erwarten Sie beim Einfall einer ebenen Welle auf einen Doppelspalt mit dem Spaltabstand d und sehr kleiner Spaltbreite. Wie ändert sich das Winkelspektrum, wenn der Spaltabstand halbiert wird? (2 Punkte)
- i) In welchem Wellenlängenbereich liegt der sichtbare Bereich des Spektrums? (1 Punkt)
- j) Zwei ideale Laser des selben Typs und Wellenlänge werden unterschiedlich stark fokussiert. Beim ersten Laser ergibt sich ein Strahltaillenradius von $w_0 = 0,2\text{ }\mu\text{m}$, beim zweiten ein Strahltaillenradius von $w_0 = 0,8\text{ }\mu\text{m}$. Sie messen den Strahlradius nun jeweils im Abstand von 1 m Entfernung zum Fokus. Bei welchem der beiden Laser messen Sie den größeren Strahlradius und warum? (1,5 Punkte)
- k) Nennen sie 2 Anwendungen von Lasern in der Medizin. (1 Punkt)
- l) Was ist der Unterschied zwischen Strahlungsfluss und Lichtstrom? (1 Punkt)

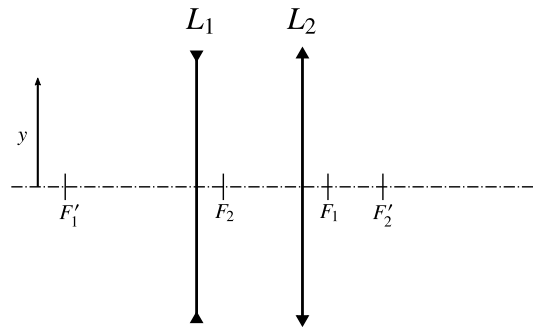
Aufgabe 2: Endoskop-Objektiv

(15,5 Punkte)

Bei flexiblen Endoskopen wird die zu beobachtende Umgebung mithilfe eines Objektivs auf die Stirnseite eines Faserbündels abgebildet. Über dieses wird das Bild weitergeleitet und kann mit einem Sensor oder mithilfe eines Okulars betrachtet werden.

Das Objektiv eines solchen Faserendoskops bestehe aus zwei dünnen Linsen mit den Brennweiten $f'_1 = -6 \text{ mm}$ und $f'_2 = 2 \text{ mm}$. Beide Linsen sind von Luft ($n = 1$) umgeben.

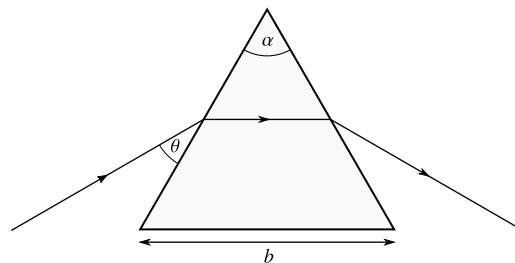
- a) Konstruieren Sie das Zwischenbild y'_{ZB} und das Bild y' des Endoskop-Objektivs. (6 Punkte)



- b) Die Linsen werden in einem Abstand von $e = 4 \text{ mm}$ montiert. Welche Gesamtbrennweite ergibt sich hierfür? (2 Punkte)
- c) Berechnen Sie die Lage der Hauptebenen. (2 Punkte)
- d) Das Faserbündel befindet sich rechts von Linse 2. Der Abstand zwischen Linse 2 und der Stirnseite des Faserbündels beträgt $2,6 \text{ mm}$. Berechnen Sie den Arbeitsabstand (den Abstand zwischen Objekt und Linse 1) für eine scharfe Abbildung auf das Faserbündel. (2,5 Punkte)
- e) Der Durchmesser des Glasfaserbündels beträgt $0,8 \text{ mm}$. Berechnen Sie den Durchmesser des beobachtbaren Bereichs. (1 Punkt)
- f) Ein Randstrahl fällt in einem Winkel von 12° zur optischen Achse auf die Stirnseite eines Faserkerns mit dem Brechungsindex $n_{\text{Kern}} = 1,48$. Der Brechungsindex des Mantels beträgt $n_{\text{Mantel}} = 1,46$. Kann dieser Strahl in der Glasfaser geführt werden? (2 Punkte)

Aufgabe 3: Prismen-Spektrometer

(10 Punkte)

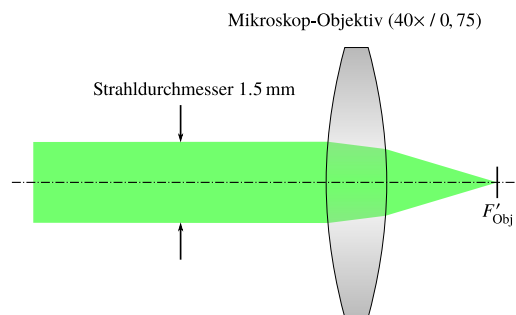


Für ein Spektrometer soll ein gleichschenkliges Prisma ausgelegt werden, wie in der obigen Skizze dargestellt. Das Prisma besteht aus Quarz-Glas mit einem Brechungsindex von $n_d = 1,4585$ bei $\lambda_d = 587,6 \text{ nm}$ und einer Abbe-Zahl $\nu_d = 67,82 = \frac{n_d - 1}{n_F - n_C}$. n_F und n_C sind dabei die Brechzahlen bei $\lambda_F = 486,1 \text{ nm}$ bzw. $\lambda_C = 656,3 \text{ nm}$.

- Berechnen Sie den Winkel α des Prismas so, dass ein Strahl mit dem Einfallswinkel $\theta = 60^\circ$ der Wellenlänge λ_d symmetrisch verläuft, d.h. der Strahl innerhalb des Prismas parallel zur Basisseite ist. (3 Punkte)
- Berechnen Sie die Materialdispersion $\frac{dn}{d\lambda}$ des Prismas. Gehen Sie dabei von linearer Dispersion aus. (3 Punkte)
- Bei der Wellenlänge λ_d soll eine Wellenlängendifferenz von 1 nm aufgelöst werden können. Welche Basislänge b ist hierfür nötig? (2 Punkte)
- Zum Vergleich wird nun das Prisma durch ein Beugungsgitter ersetzt und senkrecht beleuchtet. Welche Ordnung bei der Wellenlänge λ_d kann noch beobachtet werden, wenn das Gitter 500 Linien pro Millimeter aufweist? (2 Punkte)

Aufgabe 4: Fokussierung mit Mikroskop-Objektiv

(9,5 Punkte)



In einem Fluoreszenz-Mikroskop wird ein idealer, kollimierter Argon-Ionenlaser mit einer Wellenlänge von $\lambda = 514 \text{ nm}$, einer optischen Ausgangsleistung von 50 mW und einem Strahldurchmesser von 1,5 mm mit einem Mikroskop-Objektiv auf die Probe fokussiert. Das Mikroskop-Objektiv kann als dünne Linse angenommen werden.

Gehen Sie in den folgenden Rechnungen **NICHT** von Gauss-Strahlen aus!

- Das Mikroskop-Objektiv trägt die Bezeichnung: $\beta'_{\text{Obj}} = -40$, $\text{NA} = 0,75$, wobei der Hersteller eine Tubuslinse mit der Brennweite $f'_{\text{TL}} = 170 \text{ mm}$ spezifiziert. Wie groß ist die Brennweite des Objektivs? (1 Punkt)
- Das Mikroskop-Objektiv sei beugungsbegrenzt. Berechnen Sie den Durchmesser des Strahls im Fokus. (1 Punkt)
- Schätzen Sie die Intensität (in $\frac{\text{W}}{\text{cm}^2}$) im Fokus ab. (2 Punkte)
- Welcher Photonenanzahl pro cm^2 und Sekunde entspricht dies? (Planck'sches Wirkungsquantum: $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$, Lichtgeschwindigkeit: $c_0 = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$) (2 Punkte)
- Die Tubuslinse ($f'_{\text{TL}} = 170 \text{ mm}$) sei ein verkitteter Achromat aus einer Sammellinse ($n_d = 1,519$, $\nu_d = 61,5$) und einer Zerstreuungslinse ($n_d = 1,652$, $\nu_d = 33,6$). Bestimmen Sie die Brennweiten der beiden Linsen. (2 Punkte)
- Die Probe habe eine Dicke von 1 mm und einen Absorptionskoeffizient $\alpha(514 \text{ nm}) = 10 \text{ cm}^{-1}$. Wieviel Prozent der Intensität wird in der Probe absorbiert? (1,5 Punkte)

Aufgabe 1: Fragen über Fragen

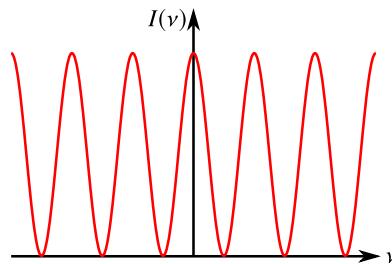
(18 Punkte)

- a) Z.B. Reflexion, Brechung, Absorption, Streuung, Inelastische Streuung
- b) Der Übergang an der Grenzfläche muss vom optisch dichteren ins optisch dünnere Medium gehen und der Einfallswinkel des Strahls muss größer als der Grenzwinkel α_G sein.
- c) Die paraxiale Optik beschränkt sich auf sehr kleine Strahlwinkel und geringe Strahlhöhen (jeweils in Bezug zur optischen Achse). Ist dies nicht gegeben, so können Abbildungsfehler und Beugungseffekte beobachtet werden.
- d) Verschiebung von Linsen oder Linsenelementen im System bei konstanter Bildlage $\rightarrow$ Veränderung der Brennweite und dadurch des Abbildungsmaßstabs ($\rightarrow$ Fokuskompensation notwendig)
- e) Schärfentiefe, Auflösung, Helligkeit (Lichtmenge)
- f) Die Gesamtbrechkraft wird im Wesentlichen durch Hornhaut (Cornea) und Augenlinse erzeugt. Sie beträgt in etwa 59 dpt. Ein gesundes Auge kann typischerweise eine Winkelminute ($1'$) auflösen.
- g) $50\times \dots$ Objektiv-Vergrößerung, $0.8 \dots$ Numerische Apertur (NA)

Sinnvolle (Förderliche) Vergrößerung:

$$\Gamma_{\text{Förderlich}} = 500 \dots 1000 \cdot NA = 500 \dots 1000 \cdot 0.8 = 400 \times \dots 800 \times$$

- h) Fouriertransformation des Doppelspalts: $\sim \cos^2(\dots)$



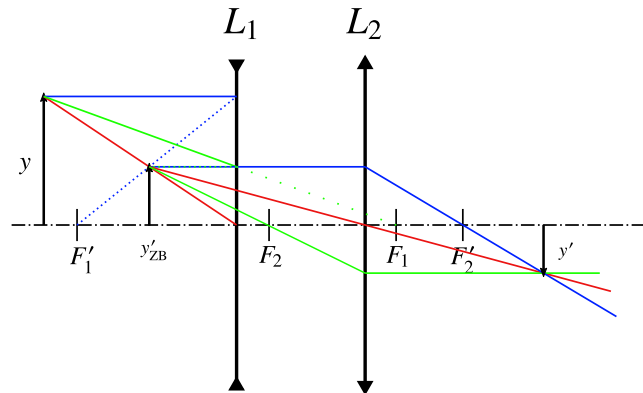
Bei Halbierung des Spaltabstands verdoppelt sich der Abstand der Peaks bzw. die Periode.

- i) Wellenlängenbereich des sichtbaren Spektrums: $\lambda_{\text{vis}} = 380 \dots 780 \text{ nm}$
- j) Bei dem Laser, der auf einen Strahltaillenradius von $w_0 = 0,2 \mu\text{m}$ fokussiert wird, ergibt sich aufgrund von $\theta_0 \sim \frac{1}{w_0}$ eine größere Divergenz. Daher wird bei gleichem Abstand zum Fokuspunkt dort ein größerer Strahlradius gemessen.
- k) Z. B. Lasik, Blutstillung, Photodynamische Therapie, ...
- l) Lichtstrom (in Lumen) ist das photometrische Äquivalent der radiometrischen Größe Strahlungsfluss (in Watt).

Aufgabe 2: Endoskop-Objektiv

(15,5 Punkte)

a)

b) **Geg.:** $f'_1 = -6 \text{ mm}$; $f'_2 = 2 \text{ mm}$; $e = 4 \text{ mm}$

$$\frac{1}{f'_{\text{ges}}} = \frac{1}{f'_1} + \frac{1}{f'_2} - \frac{e}{f'_1 \cdot f'_2}$$

$$\Rightarrow f'_{\text{ges}} = \frac{f'_1 \cdot f'_2}{f'_1 + f'_2 - e} = \frac{-6 \text{ mm} \cdot 2 \text{ mm}}{-6 \text{ mm} + 2 \text{ mm} - 4 \text{ mm}} = \underline{\underline{1,5 \text{ mm}}}$$

c) $a_{1H} = \frac{f'_{\text{ges}}}{f'_2} \cdot e = \frac{1,5 \text{ mm}}{2 \text{ mm}} \cdot 4 \text{ mm} = \underline{\underline{3 \text{ mm}}}$

$$a'_{2H} = -\frac{f'_{\text{ges}}}{f'_1} \cdot e = \frac{1,5 \text{ mm}}{-6 \text{ mm}} \cdot 4 \text{ mm} = \underline{\underline{1 \text{ mm}}}$$

d) Abstand zwischen L_2 und Bild: 2,6 mm

$$\rightarrow \text{Bildweite: } a' = 2,6 \text{ mm} - a'_{2H} = 2,6 \text{ mm} - 1 \text{ mm} = 1,6 \text{ mm}$$

$$\text{Objektweite: } \frac{1}{f'_{\text{ges}}} = \frac{1}{a'} - \frac{1}{a} \rightarrow a = \frac{a' \cdot f'_{\text{ges}}}{f'_{\text{ges}} - a'} = \frac{1,6 \text{ mm} \cdot 1,5 \text{ mm}}{1,5 \text{ mm} - 1,6 \text{ mm}} = -24 \text{ mm}$$

$$\Rightarrow \text{Abstand zwischen Objekt und } L_1: a + a_{1H} = -24 \text{ mm} + 3 \text{ mm} = \underline{\underline{-21 \text{ mm}}}$$

e) **Geg.:** $d' = 0,8 \text{ mm}$

$$|\beta'| = \frac{d'}{a} \rightarrow d = \frac{d'}{|\beta'|} = \frac{d'}{\left| \frac{a'}{a} \right|} = \frac{0,8 \text{ mm}}{\left| \frac{1,6 \text{ mm}}{-24 \text{ mm}} \right|} = \underline{\underline{12 \text{ mm}}}$$

f) **Geg.:** $u = 12^\circ$; $n_{\text{Kern}} = 1,48$; $n_{\text{Mantel}} = 1,46$

$$\text{NA} = \sqrt{n_{\text{Kern}}^2 - n_{\text{Mantel}}^2} = \sqrt{1,48^2 - 1,46^2} \approx 0,24$$

Größter Einfallswinkel, sodass Strahl noch geführt werden kann:

$$\sin u_G \cdot \underbrace{n_{\text{Luft}}}_{=1} = \text{NA} \rightarrow u_G = \arcsin 0,24 \approx \underline{\underline{14,03^\circ}}$$

 $\Rightarrow$ Der Strahl kann in der Glasfaser geführt werden, da $u < u_G$.**Alternativer Rechenweg:**

$$\text{Grenzwinkel für Totalreflexion in der Faser: } i_G = \arcsin \left(\frac{n_{\text{Mantel}}}{n_{\text{Kern}}} \right) = \arcsin \left(\frac{1,46}{1,48} \right) \approx 80,57^\circ$$

Brechungswinkel des einfallenden Strahls in der Faser: $u_{\text{Faser}} = \arcsin\left(\sin(12^\circ) \cdot \frac{n_{\text{Luft}}}{n_{\text{Kern}}}\right) \approx 8,076^\circ$

Einfallswinkel zum Lot an der Grenzfläche zwischen Kern und Mantel:

$$u'_{\text{Faser}} = 90^\circ - u_{\text{Faser}} = 90^\circ - 8,076^\circ = 81,924^\circ$$

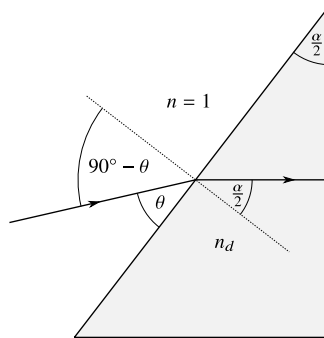
$\Rightarrow$ Ja, der Strahl kann in der Glasfaser geführt werden, da $i_G < u'_{\text{Faser}}$.

Aufgabe 3: Prismen-Spektrometer

(10 Punkte)

- a) Geg.: $n_d = 1,4585$; $\theta = 60^\circ$

Skizze:



Brechungsgesetz an Prismenfläche: $\sin(90^\circ - \theta) \cdot n = \sin(90^\circ - \theta) = \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cdot n_d$

$$\Rightarrow \alpha = 2 \cdot \arcsin\left(\frac{\sin(90^\circ - \theta)}{n_d}\right) = 2 \cdot \arcsin\left(\frac{\sin(90^\circ - 60^\circ)}{1,4585}\right) \approx \underline{\underline{40,1^\circ}}$$

- b) Geg.: $\lambda_d = 587,6 \text{ nm}$; $\lambda_F = 486,1 \text{ nm}$; $\lambda_C = 656,3 \text{ nm}$; $\nu_d = 67,82$

$$\frac{dn}{d\lambda} \approx \frac{\Delta n}{\Delta \lambda}$$

$$\nu_d = \frac{n_d - 1}{n_F - n_C} = \frac{n_d - 1}{\Delta n} \rightarrow \Delta n = \frac{n_d - 1}{\nu_d} = \frac{1,4585 - 1}{67,82} \approx 6,76 \cdot 10^{-3}$$

$$\Delta \lambda = \lambda_C - \lambda_F = 656,3 \text{ nm} - 486,1 \text{ nm} = 170,2 \text{ nm}$$

$$\Rightarrow \frac{\Delta n}{\Delta \lambda} = \frac{6,76 \cdot 10^{-3}}{170,2 \text{ nm}} = \underline{\underline{3,97 \cdot 10^{-5} \text{ nm}^{-1}}}$$

- c) $\Delta \lambda = 1 \text{ nm}$

$$A = \frac{\lambda}{\Delta \lambda} = \frac{587,6 \text{ nm}}{1 \text{ nm}} = 587,6$$

$$A = \frac{dn}{d\lambda} \cdot b \Rightarrow b = \frac{A}{\frac{dn}{d\lambda}} = \frac{587,6}{3,97 \cdot 10^{-5} \text{ nm}^{-1}} \approx \underline{\underline{14,8 \text{ mm}}}$$

- d) Geg.: $g = \frac{1}{500 \text{ mm}^{-1}} = 2 \mu\text{m}$

Größtmöglicher Beugungswinkel: $\theta_m = 90^\circ \rightarrow \sin \theta_m = 1 = m \cdot \frac{\lambda_d}{g}$

$$\Rightarrow m = \frac{g}{\lambda} = \frac{2 \mu\text{m}}{587,6 \text{ nm}} = \underline{\underline{3}}$$

Aufgabe 3: Fokussierung mit Mikroskop - Objektiv (9,5 Punkte)

a) Geg.: $\beta'_{\text{Obj}} = -40$; $\text{NA} = 0,75$; $f'_{\text{TL}} = 170 \text{ mm}$

$$\beta'_{\text{Obj}} = -\frac{f'_{\text{TL}}}{f'_{\text{Obj}}} \rightarrow f'_{\text{Obj}} = -\frac{f'_{\text{TL}}}{\beta'_{\text{Obj}}} = \frac{-170 \text{ mm}}{-40} = \underline{\underline{4,25 \text{ mm}}}$$

b) Geg.: $\lambda = 514 \text{ nm}$; $D_s = 1,5 \text{ mm}$

$$\text{NA}_{\text{Obj}} = \frac{D_s}{2f'_{\text{Obj}}}$$

$$\rightarrow d_{\text{Airy}} = 1,22 \cdot \frac{\lambda}{\text{NA}_{\text{Obj}}} = 1,22 \cdot \frac{\lambda}{D_s} \cdot 2 \cdot f'_{\text{Obj}} = 1,22 \cdot \frac{514 \text{ nm}}{1,5 \text{ mm}} \cdot 2 \cdot 4,25 \text{ mm} \approx \underline{\underline{3,55 \mu\text{m}}}$$

c) Geg.: $P_{\text{opt}} = 50 \text{ mW}$

$$I_{\text{Fokus}} = \frac{P_{\text{opt}}}{\pi \cdot \left(\frac{d_{\text{Airy}}}{2}\right)^2} = \frac{50 \text{ mW}}{\pi \cdot \left(\frac{3,55 \mu\text{m}}{2}\right)^2} \approx \underline{\underline{5,05 \frac{\text{W}}{\text{cm}^2}}}$$

d) Geg.: $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$; $c_0 = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

$$E_{\text{Phot}} = \frac{h \cdot c_0}{\lambda} = \frac{6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J s} \cdot 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{514 \text{ nm}} \approx 3,87 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

$$\Phi_{\text{Phot}} = \frac{I_{\text{Fokus}}}{E_{\text{Phot}}} = \frac{5,05 \cdot 10^5 \frac{\text{W}}{\text{cm}^2}}{3,87 \cdot 10^{-19} \text{ J}} \approx \underline{\underline{1,3 \cdot 10^{24} \frac{1}{\text{s cm}^2}}}$$

e) Geg.: $f'_{\text{TL}} = 170 \text{ mm}$; $\nu_1 = 61,5$; $\nu_2 = 33,6$

$$\varphi_1 = \frac{\nu_1}{\nu_1 - \nu_2} \cdot \varphi_{\text{TL, ges}} \rightarrow f'_1 = \frac{\nu_1 - \nu_2}{\nu_1} \cdot f'_{\text{TL}} = \frac{61,5 - 33,6}{61,5} \cdot 170 \text{ mm} \approx \underline{\underline{77,12 \text{ mm}}}$$

$$f'_2 = \frac{\nu_2 - \nu_1}{\nu_2} \cdot f'_{\text{TL}} = \frac{33,6 - 61,5}{33,6} \cdot 170 \text{ mm} \approx \underline{\underline{-141,16 \text{ mm}}}$$

f) Geg.: $z = 1 \text{ mm}$; $\alpha = 10 \text{ cm}^{-1}$

$$\frac{I}{I_0} = e^{-\alpha \cdot z} = e^{10 \text{ cm}^{-1} \cdot 1 \text{ mm}} \approx 0,368$$

$$\Rightarrow \text{Absorption: } 1 - 0,368 = \underline{\underline{63,2 \%}}$$

Vorname: _____ Name: _____

Matrikelnummer: _____ Studiengang: _____

Aufgabe 1: Fragen über Fragen

(18 Punkte)

- a) In welchem Wellenlängenbereich liegt das sichtbare Spektrum? Wie nennt man die Wellenlängenbereiche unterhalb und oberhalb des sichtbaren Bereichs? (2 Punkte)
- b) Sie beleuchten eine kleine runde Blendenöffnung. Warum beobachten Sie hinter der Blende nicht nur einen runden Lichtfleck in der Größe der Blendenöffnung? (1,5 Punkte)
- c) Wie hängen Lichtstrahlen und Wellenfront grundsätzlich zusammen? (1 Punkt)
- d) Was ist der Unterschied zwischen Feld- und Aperturblende? Wie werden die Bilder der beiden Blenden jeweils genannt? (2 Punkte)
- e) Erklären Sie kurz die Begriffe Telezentrie (oder telezentrisch) und Vignettierung. (2 Punkte)
- f) Sie verwenden ein Mikroskop mit Tubuslinse. Wie muss hierbei das Objekt positioniert werden? (1 Punkt)
- g) Blaues und rotes Licht trifft auf eine einfache sphärische Sammellinse. Sie verschieben nun einen Schirm kontinuierlich auf der optischen Achse von der Linse weg. Was beobachten Sie auf dem Schirm? (1 Punkt)
- h) Was ist der Unterschied zwischen „Adaption“ und „Akkommodation“ beim Auge? (1 Punkt)
- i) Nennen sie 2 Ursachen für Hyperobie und durch welche Linsenart diese korrigiert werden kann. (1,5 Punkte)
- j) Bei der subjektiven Refraktionsbestimmung werden sogenannte Landolt-Ringe als Normsehzeichen verwendet. Wie sieht dieser Landolt-Ring aus. Was bedeutet ein Visus von 1? (2 Punkte)
- k) Warum ist es wesentlich einfacher ein Mikroskop als zusammengesetztes optisches System zu realisieren, als mit einer einfachen Einzellinse? (1 Punkt)
- l) Sie kaufen eine grüne und eine blaue LED mit derselben optischen Leistung von 1 W. Bei welcher der beiden LEDs erwarten Sie eine höhere Leuchtdichte und warum? (2 Punkte)

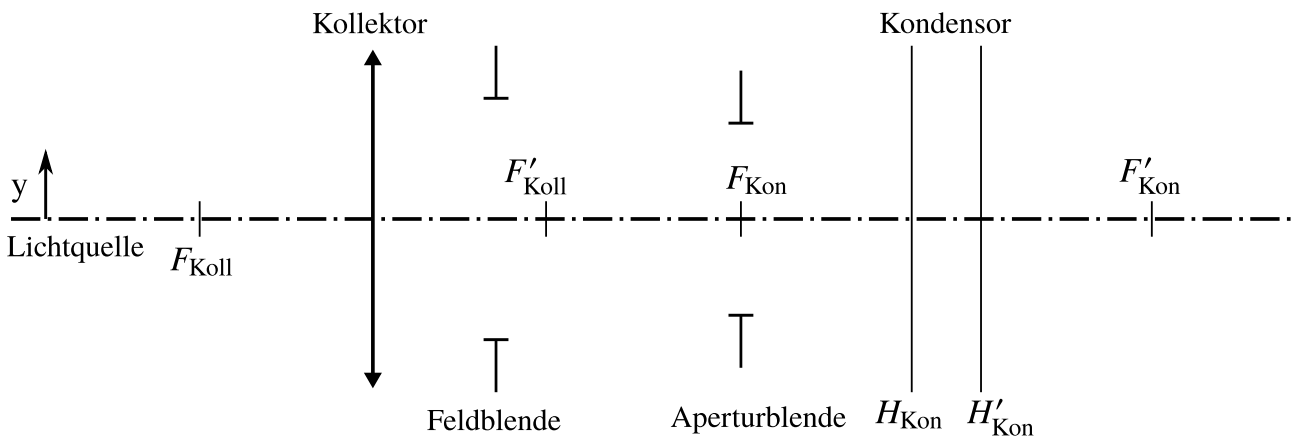
Aufgabe 2: Köhlersche Beleuchtung

(18 Punkte)

Die Köhlersche Beleuchtung ist eine Beleuchtungsmethode, die häufig in der Mikroskopie eingesetzt wird. Sie ermöglicht die homogene Beleuchtung eines zu untersuchenden Präparats, wobei über die Apertur- und Feldblende die Helligkeit sowie die Größe des auszuleuchtenden Bereichs eingestellt werden kann. Grundsätzlich besteht der Aufbau aus zwei Sammellinsen, dem Kollektor und dem Kondensor, und der Feld- und Aperturblende.

Alle Linsen sind von Luft umgeben ($n_L = 1,0$).

- a) Konstruieren Sie den Strahlengang durch das Linsensystem ausgehend von der Lichtquelle (dem Objekt y). Zeichnen Sie das Zwischenbild y' ein. (6 Punkte)

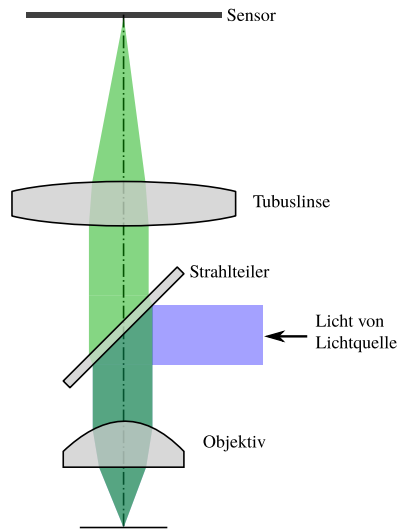


- b) Der Kollektor sei eine dünne Sammellinse mit einer Brennweite von $f'_{\text{Koll}} = 20 \text{ mm}$. Die Lichtquelle befindet sich in einem Abstand von 50 mm vor dem Kollektor und soll mit diesem in die Ebene der Aperturblende abgebildet werden. Wo müssen Sie die Aperturblende positionieren und welchen Durchmesser muss diese haben, wenn die Lichtquelle einen Durchmesser von 10 mm hat? (2 Punkte)
- c) Der Kondensor sei eine dicke Plankonvex-Linse mit einer Dicke von 8 mm , wobei die zweite Fläche plan ist. Das Glas des Kondensors habe einen Brechungsindex von $n_G = 1,51$ und die Brennweite der Linse soll $f'_{\text{Kon}} = 10 \text{ mm}$ betragen. Berechnen Sie den Radius der vorderen Fläche. (1,5 Punkte)
- d) Wo liegen die Hauptebenen des Kondensors? (2 Punkte)
- e) Der Kondensor wird so positioniert, dass sich seine objektseitige Brennebene in der Ebene der Aperturblende befindet. Die Feldblende wird nun 10 mm rechts vom Kollektor angebracht und soll über den Kondensor in die Ebene des Präparats abgebildet werden. In welchem Abstand zur zweiten Linsenfläche des Kondensors befindet sich das Präparat? (3 Punkte)
- f) Wo liegen die Ein- und Austrittspupille des Gesamtsystems? **Hinweis:** Keine Rechnung erforderlich! (1,5 Punkt)
- g) Die Lichtquelle sei eine LED mit einer optischen Leistung von 15 W und einer aktiven Leuchtfläche von 1 mm^2 , die gleichmäßig in den Halbraum abstrahlt. Wie groß ist die Strahldichte nach der Lichtquelle? (2 Punkte)

Aufgabe 3: Fluoreszenz-Mikroskop mit Strahlteiler

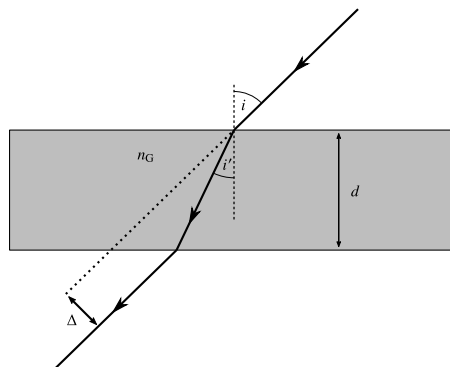
(9 Punkte)

Skizze:



Im Aufbau eines Fluoreszenz-Mikroskops wird ein Strahlteiler verwendet, welcher das Anregungslicht in den Strahlengang einkoppelt und durch das Objektiv auf der Probe fokussiert wird. Die fluoreszierende Probe wird anschließend über Objektiv und Tubuslinse auf einem Sensor abgebildet, wobei das Fluoreszenzlicht eine Wellenlänge von $\lambda = 525 \text{ nm}$ hat.

- Die Tubuslinse habe eine Brennweite von 160 mm , das Objektiv eine Brennweite von 4 mm . Welcher Abbildungsmaßstab ergibt sich damit? (1 Punkt)
- Das Objektiv ist mit einer numerischen Apertur von $NA = 0,6$ spezifiziert. Lassen sich damit Details der fluoreszierenden Probe in einer Größe von $2 \mu\text{m}$ noch einwandfrei beobachten? (1,5 Punkte)
- Ist eine Photonenenergie von $4,8 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ für die Anregung der Fluoreszenz ausreichend? (Planck'sches Wirkungsquantum: $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$, Lichtgeschwindigkeit: $c_0 = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$) (1,5 Punkte)
- Der Strahlteiler sei eine planparallele Glasplatte mit einer Dicke von $d = 2 \text{ mm}$ (Siehe Skizze). Das Glas der Platte habe einen Brechungsindex von $n_G = 1,51$. Berechnen Sie den Parallelversatz Δ eines Strahls, der unter einem Winkel von $i = 20^\circ$ zum Lot der planparallelen Platte einfällt. Die Platte befindet sich in Luft. (4 Punkte)

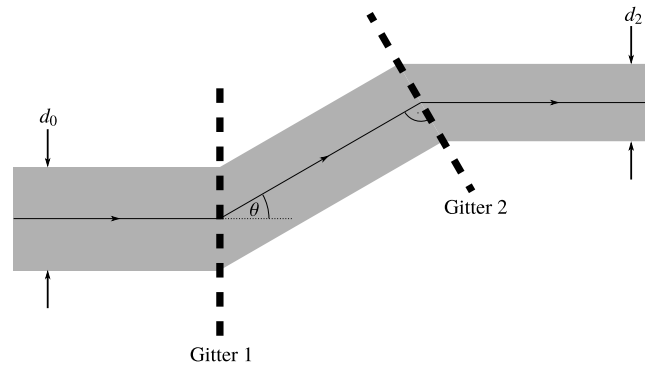


- Warum wirkt sich der Parallelversatz der Strahlen nicht auf die Größe des Bildes auf dem Sensor aus? (1 Punkt)

Aufgabe 4: Strahlumlenkung mit Beugungsgittern

(8 Punkte)

Skizze:



Mit einem Aufbau aus zwei Beugungsgittern soll ein kollimierter Strahl versetzt werden. Der Strahl wird zunächst mit Gitter 1 um einen Winkel θ umgelenkt und anschließend mit Gitter 2, welches senkrecht zum Strahl steht, wieder parallel zum Ausgangsstrahl ausgerichtet. Die Gitterperioden der beiden Beugungsgitter weichen voneinander ab, jedoch stimmt der Beugungswinkel von Gitter 1 der 1. Ordnung mit dem Beugungswinkel der 3. Ordnung von Gitter 2 überein.

- Licht der Wellenlänge $\lambda_1 = 633 \text{ nm}$ führt zu einem Beugungswinkel von $\theta = 40^\circ$. Bestimmen Sie die beiden Gitterperioden. (2 Punkte)
- Um welchen Winkel muss Gitter 2 gedreht werden, wenn nun Licht der Wellenlänge $\lambda_2 = 532 \text{ nm}$ verwendet wird? (2 Punkte)
- Nachdem der Strahl die beiden Gitter passiert hat, verändert sich auch sein Durchmesser. Um welchen Faktor d_2/d_0 verändert sich der Durchmesser des Strahls, wenn wieder Licht der Wellenlänge λ_1 verwendet wird? (4 Punkte)

Aufgabe 1: Fragen über Fragen**(18 Punkte)**

- a) Wellenlängenbereich: 380...780 nm

Unterhalb: Ultraviolett

Oberhalb: Infrarot

- b) Beugung an der Blende führt zu Kugelwellen (Huygens'sches Prinzip), die sich überlagern und das Muster eines Beugungsscheibchens ausbilden.
- c) Lichtstrahlen stehen senkrecht zur Wellenfront.
- d) Mit der Aperturblende wird das Lichtbündel begrenzt, die Feldblende begrenzt die Größe des Feldes. Die Bilder der Aperturblende werden als Pupillen bezeichnet, die der Feldblende als Luken.
- e) Telezentrie: Der Hauptstrahlen verlaufen parallel zur optischen Achse.

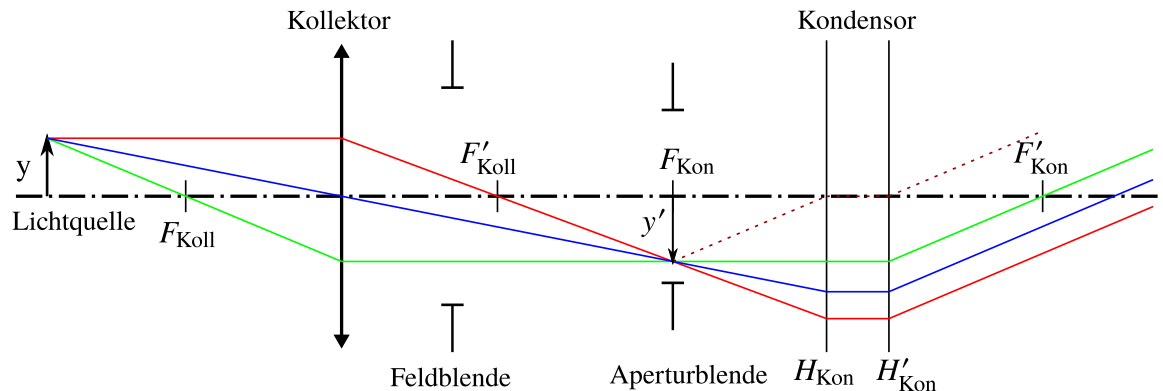
Vignettierung: Das Lichtbündel wird nicht durch die Aperturblende begrenzt und führt daher zu Helligkeitsabfall im Randbereich.

- f) Das Objekt muss in der objektseitigen Brennebene des Objektivs stehen.
- g) Aufgrund der chromatischen Längsabweichung kann zunächst der blaue, dann der rote Fokus beobachtet werden.
- h) Der Begriff Adaption bezeichnet die Anpassung des Auges an die Umgebungshelligkeit, während die Akkomodation die Anpassung der Fokusslage bezeichnet.
- i) Auge zu kurz, Cornea zu schwach gekrümmt, Brennweite der Linse zu lang (2 davon)
- Korrektur mittels Sammellinse.
- j) Ring, der in eine von 8 Richtungen geöffnet ist. Ein Visus von 1 bedeutet Normalsichtigkeit, bei welcher 2 Objekte unter einem Winkel von 1 Bogenminute getrennt wahrgenommen werden können.
- k) Für eine hohe Vergrößerung wird eine sehr kurze Brennweite benötigt, was mit einer Einzellinse nur mit sehr kleinen Krümmungsradien erzielt werden kann.
- l) Die grüne LED hat eine höhere Leuchtdichte, da in dort das Auge wesentlich empfindlicher ist.

Aufgabe 2: Köhlersche Beleuchtung

(18 Punkte)

a)

b) Geg.: $f'_{\text{Koll}} = 20 \text{ mm}$; $a = -50 \text{ mm}$; $y = 10 \text{ mm}$

$$\frac{1}{f'_{\text{Koll}}} = \frac{1}{a'} - \frac{1}{a} \Rightarrow a' = \frac{f'_{\text{Koll}} \cdot a}{f'_{\text{Koll}} + a} = \frac{20 \text{ mm} \cdot (-50 \text{ mm})}{20 \text{ mm} - 50 \text{ mm}} \approx \underline{\underline{33,33 \text{ mm}}}$$

$$y' = \left| \frac{a'}{a} \right| \cdot y = \left| \frac{33,33 \text{ mm}}{-50 \text{ mm}} \right| \cdot 10 \text{ mm} \approx \underline{\underline{6,67 \text{ mm}}}$$

$\Rightarrow$ Die Aperturblende muss in einem Abstand von 33,33 mm rechts vom Kollektor positioniert werden und einen Durchmesser von 6,67 mm besitzen.

c) Geg.: $n_G = 1,51$; $f'_{\text{Kon}} = 10 \text{ mm}$; $r_2 = \infty$; $d = 8 \text{ mm}$

$$\frac{1}{f'_{\text{Kon}}} = (n_G - 1) \cdot \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) + \frac{d \cdot (n_G - 1)^2}{n_G \cdot r_1 \cdot r_2} \text{ mit } r_2 = \infty$$

$$\rightarrow \frac{1}{f'_{\text{Kon}}} = (n_G - 1) \cdot \frac{1}{r_1} \rightarrow r_1 = f'_{\text{Kon}} \cdot (n_G - 1) = 10 \text{ mm} \cdot (1,51 - 1) = \underline{\underline{5,1 \text{ mm}}}$$

d) $a_{1H} = f'_{\text{Kon}} \cdot \varphi_2 \cdot \frac{d}{n_G} = f'_{\text{Kon}} \cdot \frac{1 - n_G}{r_2} \cdot \frac{d}{n_G} = \underline{\underline{0 \text{ mm}}}$, da $r_2 = \infty$

$$a'_{2H'} = -f'_{\text{Kon}} \cdot \frac{n_G - 1}{r_1} \cdot \frac{d}{n_G} = -10 \text{ mm} \cdot \frac{1,51 - 1}{5,1 \text{ mm}} \cdot \frac{8 \text{ mm}}{1,51} = \underline{\underline{-5,3 \text{ mm}}}$$

e) Abstand der Feldblende zu H_{Kon} : $a_B = -33,33 \text{ mm}$

$$a'_B = \frac{a_B \cdot f'_{\text{Kon}}}{a_B + f'_{\text{Kon}}} = \frac{-33,33 \text{ mm} \cdot 10 \text{ mm}}{-33,33 \text{ mm} + 10 \text{ mm}} = \underline{\underline{14,3 \text{ mm}}}$$

$$\text{Abstand zur Linsenfläche: } s' = a'_B + a'_{2H'} = 14,3 \text{ mm} - 5,3 \text{ mm} = \underline{\underline{9 \text{ mm}}}$$

f) Die Eintrittspupille liegt in der Ebene der Lichtquelle, da diese vom Kollektor in die Aperturblende abgebildet wird und umgekehrt. Die Austrittspupille liegt im Unendlichen, da die Aperturblende in der Brennebene des Kondensors liegt.

g) Geg.: $\Phi = 15 \text{ W}$; $A = 1 \text{ mm}^2$; $\Omega = 2\pi \text{ sr}$

$$\rightarrow L = \frac{\Phi}{A \cdot \Omega} = \frac{15 \text{ W}}{1 \text{ mm}^2 \cdot 2\pi \text{ sr}} \approx \underline{\underline{2,39 \frac{\text{W}}{\text{mm}^2 \text{ sr}}}}$$

Aufgabe 3: Fluoreszenz-Mikroskop mit Strahlteiler

(9 Punkte)

- a) Geg.: $f'_T = 160 \text{ mm}$; $f'_{\text{Obj}} = 4 \text{ mm}$

$$\beta' = -\frac{f'_T}{f'_{\text{Obj}}} = -\frac{160 \text{ mm}}{4 \text{ mm}} = \underline{\underline{-40}}$$

- b) $\text{NA} = 0,6$, $\lambda = 525 \text{ nm}$

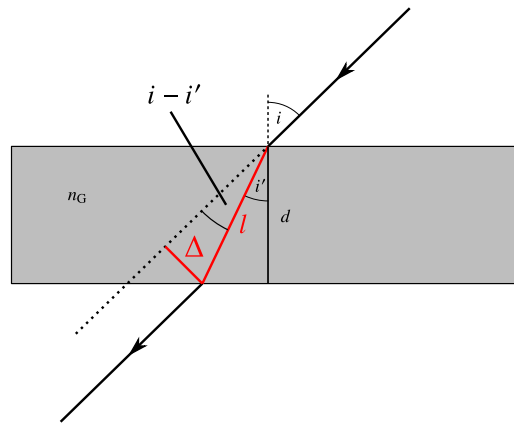
$$\Delta = 0,61 \cdot \frac{\lambda}{\text{NA}} = 0,61 \cdot \frac{525 \text{ nm}}{0,6} \approx \underline{\underline{533,75 \text{ nm}}} < 2 \mu\text{m} \Rightarrow \text{Ja, kann aufgelöst werden!}$$

- c) Geg.: $E_{\text{Phot, Absorption}} = 4,8 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

$$E_{\text{Phot, Fluoreszenz}} = \frac{h \cdot c_0}{\lambda_F} = \frac{6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J s} \cdot 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{525 \text{ nm}} \approx \underline{\underline{3,79 \cdot 10^{-19} \text{ J}}} < E_{\text{Phot, Absorption}} \Rightarrow \text{Ja, ist ausreichend!}$$

(Die Argumentation über die kürzere Anregungswellenlänge ist ebenfalls zulässig)

- d) Skizze:



$$\Delta = \sin(i - i') \cdot l$$

$$l = \frac{d}{\cos i'}$$

$$i' = \arcsin\left(\frac{\sin i}{n_G}\right)$$

$$\rightarrow \Delta = \sin\left[i - \arcsin\left(\frac{\sin(i)}{n_G}\right)\right] \cdot \frac{d}{\cos\left(\arcsin\left(\frac{\sin(i)}{n_G}\right)\right)} = \sin\left[20^\circ - \arcsin\left(\frac{\sin(20^\circ)}{1,51}\right)\right] \cdot \frac{2 \text{ mm}}{\cos\left(\arcsin\left(\frac{\sin(20^\circ)}{1,51}\right)\right)}$$

$$\Rightarrow \Delta \approx \underline{\underline{0,247 \text{ mm}}}$$

- e) Da der Einfallswinkel der Strahlen derselbe ist und diese daher immernoch im selben Punkt fokussiert werden.

Aufgabe 4: Strahlumlenkung mit Beugungsgittern**(8 Punkte)**a) Geg.: $\Theta_1 = 40^\circ$, $\lambda = 633 \text{ nm}$

$$\text{Gitter 1: } \sin \Theta_1 = \frac{\lambda}{g_1} \rightarrow g_1 = \frac{\lambda}{\sin \Theta_1} = \frac{633 \text{ nm}}{\sin 40^\circ} \approx \underline{\underline{0,984 \mu\text{m}}}$$

$$\text{Gitter 2: } \sin \Theta_1 = 3 \cdot \frac{\lambda}{g_1} \rightarrow g_1 = \frac{3\lambda}{\sin \Theta_1} = \frac{3 \cdot 633 \text{ nm}}{\sin 40^\circ} \approx \underline{\underline{2,954 \mu\text{m}}}$$

b) Geg.: $\lambda_2 = 532 \text{ nm}$

$$\sin \Theta_{\text{neu}} = \frac{\lambda_2}{g_1} \rightarrow \Theta_{\text{neu}} = \arcsin \left(\frac{532 \text{ nm}}{0,984 \mu\text{m}} \right) \approx 32,73^\circ$$

$$\Rightarrow \text{Winkel, um den Gitter 2 gedreht werden muss: } 40^\circ - 32,73^\circ \approx \underline{\underline{7,27^\circ}}$$

c) Durchmesser nach Gitter 1: $d_1 = d_0 \cdot \cos \Theta$

$$\text{Durchmesser nach Gitter 2: } d_2 = d_1 \cdot \cos \Theta = d_0 \cdot \cos^2 \Theta$$

$$\rightarrow \frac{d_2}{d_0} = \cos^2 \Theta$$

$$\Rightarrow \frac{d_2}{d_0} = \cos^2 40^\circ \approx \underline{\underline{0,59}}$$