Prof. A. Stahl / Priv-Doz. S. Roth
achim.stahl@rwth-aachen.de
Tel: 0241-80 27301

Experimentalphysik III
WS 2017/18

Nachhol-Klausur

13/02/2018

Name: __Musterlösung________

Matrikel: ________________________

A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	Σ

Σ ______ Initials _____

Aufgabe 1: Geometrische Abbildung an Spiegeln und Linsen

Konstruieren Sie zeichnerisch das Bild des mit einem roten Punkt und einem G bezeichneten Gegenstandspunktes bzw. bei Teilaufgabe c) des parallelen Strahlenbündels.

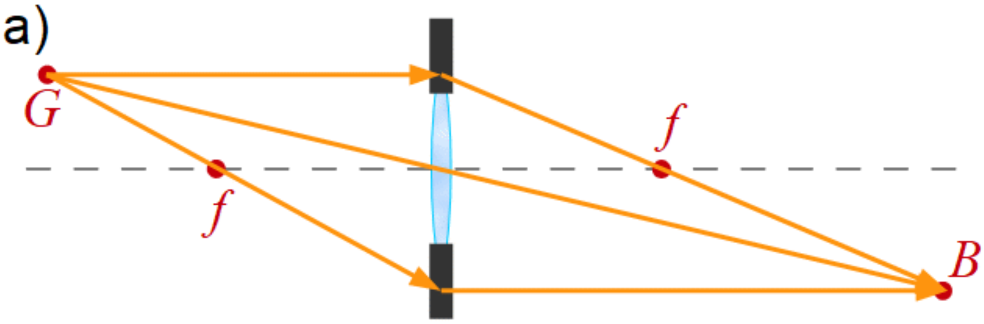
a) Abbildung an einer dünnen Sammellinse **2P**

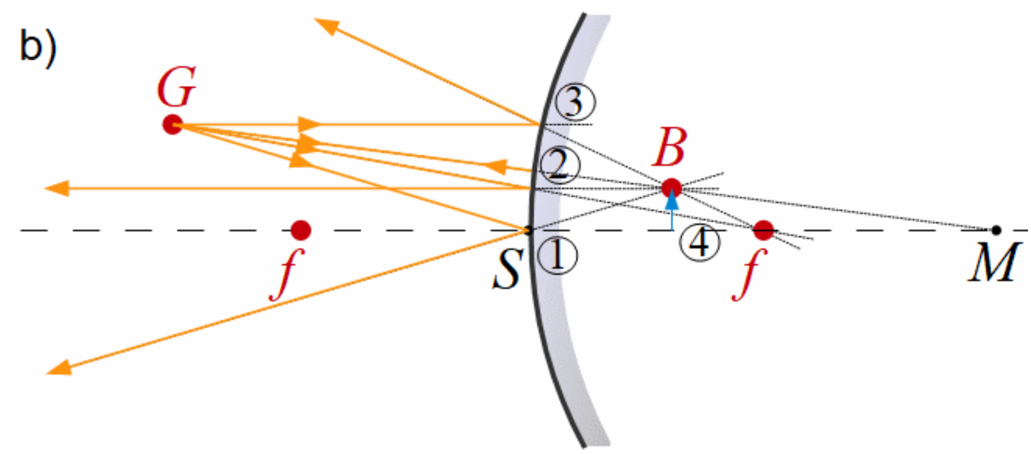
b) Abbildung an einem Hohlspiegel **2P**

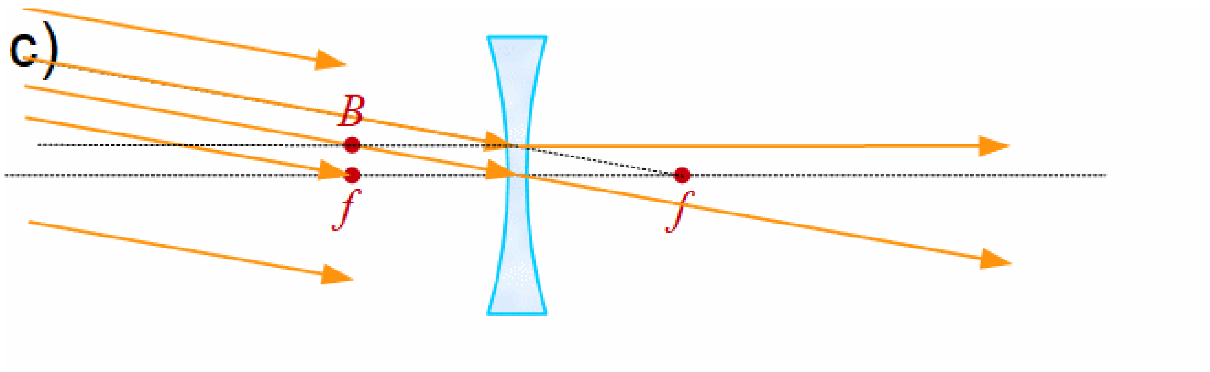
c) Abbildung eines parallelen Strahlenbündels an einer dünnen Zerstreuungslinse **2P**

d) Die Abbildung an zwei dünnen Linsen. **4P**

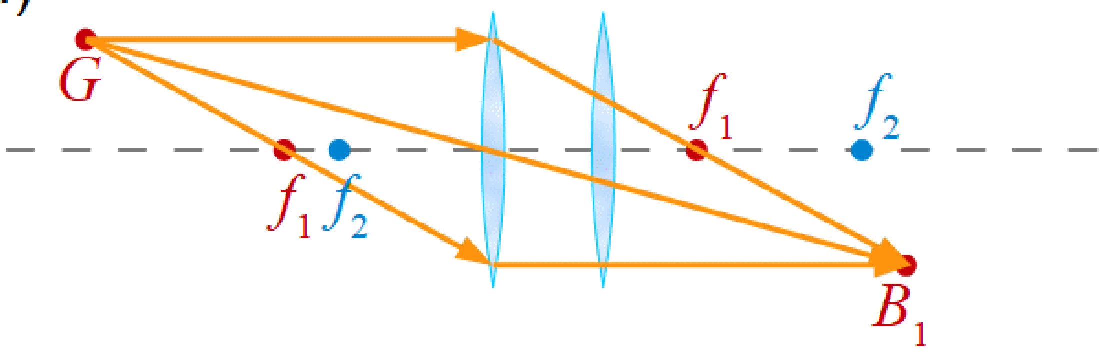
Falls Sie mehrere Versuche benötigen, bitte klar markieren welcher gilt!



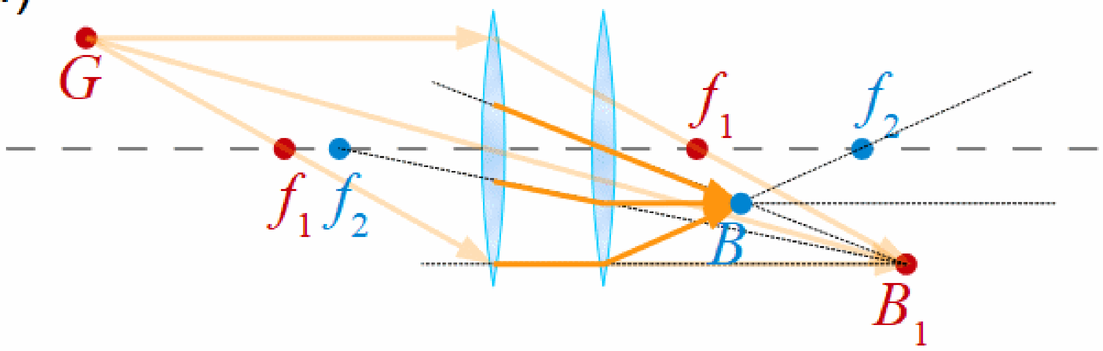




d)



d)



Die beiden Schritte können auch in einem Bild zusammen dargestellt sein.

Je 2P pro Bild/Schritt, wenn alles richtig ist.

Bei einem einzelnen Fehler je Bild/Schritt 1P Abzug.

Bilder/Schritte mit mehr als einem Fehler: 0P

Es müssen jeweils genügend Strahlen konstruiert sein, damit die Lage des Bildes eindeutig bestimmt ist. Weitere Strahlen sind nicht gefordert. Zusätzliche falsche Strahlen führen trotzdem zu Abzügen.

Aufgabe 2: Matrizenoptik

Mit der unten abgebildeten Kamera wird ein wertvolles Kunstobjekt in einem Museum überwacht.

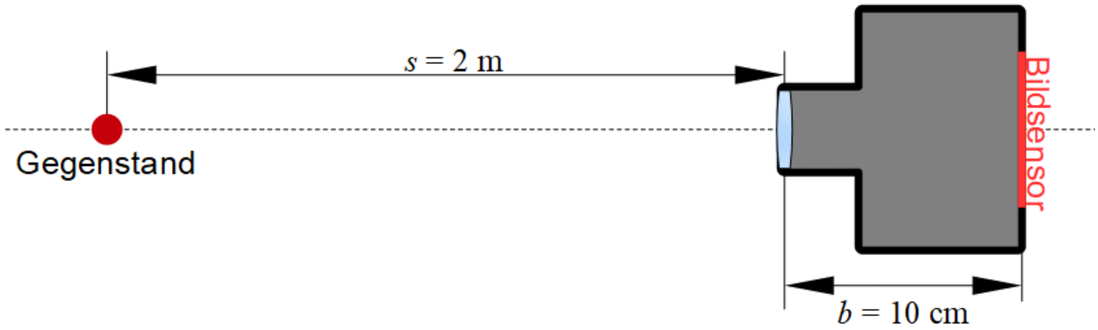
a) Berechnen Sie die Abbildungsmatrix für die Abbildung des Kunstobjektes auf den Sensor der Kamera. **3P**

b) Welche Brennweite muss die Linse haben, um eine scharfe Abbildung zu erreichen? **3P**

c) Im Rahmen einer Umgestaltung der Ausstellung wird das Kunstobjekt verschoben. Der Abstand der neuen Position zur Kamera beträgt $s = 3\ \mathrm{m}$. Um weiterhin eine scharfe Abbildung zu ermöglichen, bringen Techniker eine zweite Linse im Abstand $d = 2\ \mathrm{cm}$ vor der bereits vorhandene Linse an. Welcher Typ einer Linse käme hierfür in Frage? **1P**

d) Berechnen Sie die Brennweite der Zusatzlinse aus Teilaufgabe c). **3P**

Alle Linsen können durch dünne Linsen approximiert werden. Brechungsindex Luft $n = 1$.



Hier die Matrizen einiger optischer Elemente:

- freie Ausbreitung eines Lichtstrahls über die Strecke s: $\mathcal{M}_T(s) = \begin{pmatrix} 1 & s \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$.
- Reflexion an einem ebenen Spiegel: $\mathcal{M}_{ES} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$
- Reflexion an einem Wölbespiegel mit Krümmungsradius R: $\mathcal{M}_{SS}(R) = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 2/R & -1 \end{pmatrix}$
- Brechung an einer dünnen Linse mit Brechkraft D: $\mathcal{M}_L = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -D & 1 \end{pmatrix}$

a) $\mathcal{M} = \mathcal{M}_T(b) \cdot \mathcal{M}_L \cdot \mathcal{M}_T(s)$ Ansatz 1P

$$= \begin{pmatrix} 1-bD & b+s-bsD \\ -D & 1-Ds \end{pmatrix}$$ Berechnung 2P

b) Strahl vom Gegenstand muss am Sensor wieder die opt. Achse erreichen. Ansatz 1P (Satz oder Formel)

$$\begin{pmatrix} 0 \\ \beta \end{pmatrix} = \mathcal{M} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ \alpha \end{pmatrix} = \alpha \begin{pmatrix} b+s-bsD \\ 1-Ds \end{pmatrix}$$

$$\Rightarrow b+s-bsD = 0$$

$$D = \frac{b+s}{b \cdot s} \rightarrow \underbrace{f = \frac{b \cdot s}{s+b}}_{1P} = \underbrace{9{,}5 \ldots \mathrm{cm}}_{1P}$$

c) Zerstreuungslinse oder konkav oder bikonkav oder ~~P~~ plankonkav 1P

muß da sein!

d) $\mathcal{M} = \mathcal{M}_T(b) \cdot \mathcal{M}_L(D) \cdot \mathcal{M}_T(d) \cdot \mathcal{M}_L(D_V) \cdot \mathcal{M}_T(s-d)$ 1P

$$= \begin{pmatrix} 1-bD-bD_V-dD_V+bdDD_V & b+s-bsD+d^2D_V-dsD_V+bdD_V-bsD_V-bd^2DD_V+bdsDD_V \\ -D_V-D-dDD_V & 1-Ds-D_Vs+dD_V-d^2DD_V+dsDD_V \end{pmatrix}$$

$$\mathcal{M}_{12} = 0 \rightarrow D_V = \frac{b+s-bDs}{(-b-d+bdD)(d-s)}$$ 1P

$\Rightarrow$ |

$= -0{,}196\,\mathrm{m}$ 1P

Aufgabe 3: Beugung am Gitter

Eine CD wird mit weißem Licht bestrahlt. Man beobachtet die Beugung an den Strukturen der CD und stellt dabei fest, dass die grüne Farbe des Spektrums Licht ($\lambda = 580 \text{ nm}$) in erster Ordnung unter einem Winkel von 21° gebeugt wird.

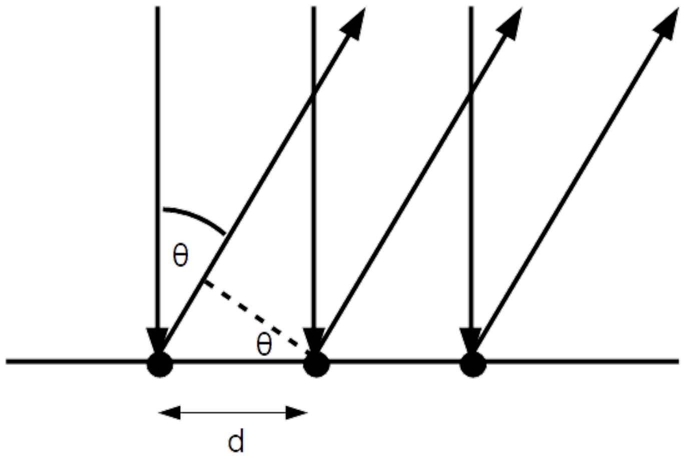
a) Erstellen Sie eine Skizze der Beugung von senkrecht auf die CD einfallenden Lichtstrahlen. **3P**

b) Wie groß ist der Rillenabstand d auf der CD? **3P**

c) Überlagern sich bei der Beugung die Spektren der ersten und zweiten Ordnung? Das Spektrum des sichtbares Lichts umfasst einen Wellenlängenbereich von 380 nm bis 780 nm. **4P**

Lösung

a)



3P: für die richtige Skizze

b)

Das Maximum der Ordnung n bei der Beugung am Gitter mit Linienabstand d liegen bei Winkeln θ mit folgender Beziehung

$$d \sin\theta = n\,\lambda$$

Mit dem Winkel der Beugung 1. Ordnung ergibt sich

$$d = \frac{\lambda}{\sin\theta} = \frac{580\ \text{nm}}{\sin 21°} = 1{,}6\ \ \mu\text{m}$$

1P: Ansatz
1P: Umstellung
1P: Richtiges Endergebnis

c)

Winkel, unter dem das rote Ende der 1. Ordnung liegt:

$$\theta_{rot} = \arcsin\frac{\lambda_{rot}}{d} = \arcsin\frac{780\ \text{nm}}{1600\ \text{nm}} = 29°$$

Winkel, unter dem das violette Ende der 2. Ordnung liegt:

$$\theta_{vio} = \arcsin\frac{2\lambda_{vio}}{d} = \arcsin\frac{2 \cdot 380\ \text{nm}}{1600\ \text{nm}} = 28°$$

Die Spektren der 1. Ordnung und der 2. Ordnung überlagern sich.

2P: Für Erkennung des Prinzips, d.h. Vergleich von rot/1.Ordnung mit violett/2.Ordnung
2P: Je 1P pro richtig berechnetem Winkel

Aufgabe 4: Der Fotoelektrische Effekt

Betrachten Sie den Fotoeffekt an einer PbS-Fotokathode. Das Material hat eine Austrittsarbeit von $W_A = 1{,}373\ \mathrm{eV}$.

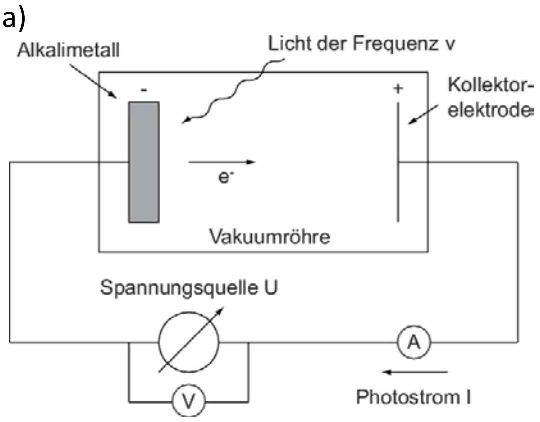
a) Skizzieren Sie den Aufbau. Geben Sie dabei an, wo die Gegenspannung U_g angelegt wird und wo der Fotostrom I_F gemessen wird. **3P**

b) Die Fotokathode wird mit rotem Licht ($\lambda_{rot} = 650\ nm$) beleuchtet. Fertigen Sie einen Graphen an, der den Fotostrom als Funktion der Gegenspannung U_g zeigt. **2P**

c) Wie verändert sich der Graph aus Teilaufgabe b) mit der Intensität der Beleuchtung? Tragen Sie zur Beantwortung dieser Frage einen weiteren Graphen in das Diagramm ein, der eine geringere Intensität repräsentiert. **2P**

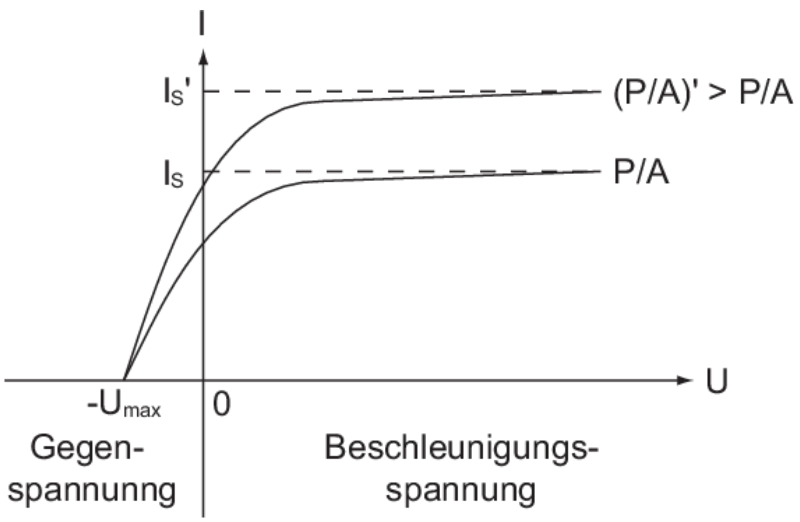
d) Sie wiederholen das Experiment mit grünem Licht ($\lambda_{grün} = 550\ nm$) und blauem Licht ($\lambda_{blau} = 450\ nm$). Für jede der drei Farben (rot, grün, blau) bestimmen Sie die Gegenspannung $U_{g,max}$, bei der der Fotostrom gerade einsetzt. Tragen Sie diese Gegenspannung gegen die Frequenz des Lichtes auf (3 Messpunkte). Beschriften Sie die Messpunkte mit den zugehörigen Farben. Wie kann man aus dem Graphen das Planck'sche Wirkungsquantum bestimmen? **3P**

a)



1P: Fotokathode mit Beleuchtung
1P: Kollektorelektrode
1P: Messanordnung für Strom und Spannung (inkl. Spannungsquelle)

b)



1P: Strom steigt erst jenseits der max. Gegenspannung an

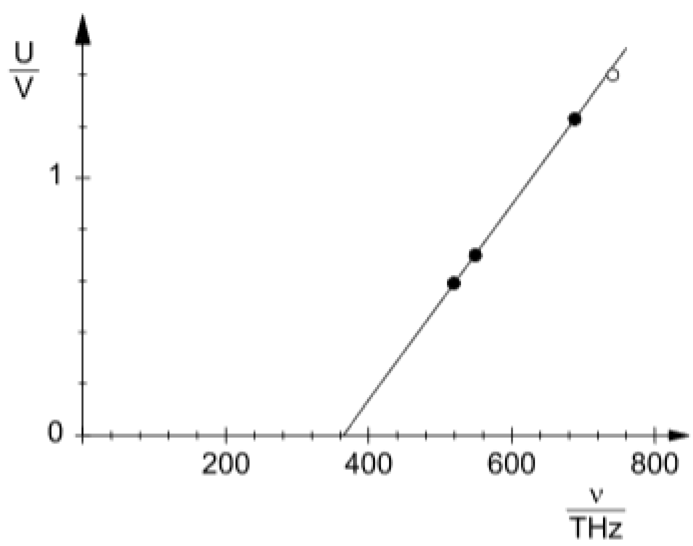
1P: Strom geht rechts in Sättigung

c)

1P: Sättigungsstrom hängt von der Intensität ab

1P: Korrekte Beschriftung, welche Kurve zur höheren Intensität gehört

d)



1P: Graph

1P: Beschriftung der Messpunkte (links: rot, Mitte: grün, rechts: blau)

Aus der Steigung kann man das Planck'sche Wirkungsquantum bestimmen.

$$U_g = \frac{1}{e}(h\nu - W_A)$$

1P: Satz oder Formel

Aufgabe 5: Abstrahlung einer Glühbirne

Eine Glühbirne enthält eine heiße Glühwendel, die im Folgenden als schwarzer Körper behandelt werden soll.

a) Auf welche Temperatur muss die Glühwendel aufgeheizt werden, damit das spektrale Maximum bei $580\ \mathrm{nm}$ (gelbes Licht) liegt? **4P**

b) Welche Oberfläche hat die Glühwendel, wenn auf der $3\ m$ entfernten Wand eine Bestrahlungsstärke von $0{,}53\ \mathrm{W/m^2}$ vorliegt? **6P**

Stefan-Boltzmann-Gesetz: $P = \sigma A T^4$ mit $\sigma = 5{,}67 \cdot 10^{-8}\ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2K^4}}$

Wiensches Verschiebungsgesetz: $\lambda_{max} T = 2{,}898 \cdot 10^{-3}\ \mathrm{m} \cdot \mathrm{K}$

Lösung

a)

Berechnung der Temperatur:

$$\lambda_{max} T = 2{,}898 \cdot 10^{-3}\ \mathrm{m} \cdot \mathrm{K}$$

$$T = \frac{2{,}898 \cdot 10^{-3}\ \mathrm{m} \cdot \mathrm{K}}{580 \cdot 10^{-9}\ \mathrm{m}} = 5 \cdot 10^{3}\ \mathrm{K}$$

2P: für Formel T=

2P: richtiges Endergebnis

b)

Leistung der Glühbirne:

$$P = 4\pi r^2 \cdot E_E = 113\ \mathrm{m^2} \cdot 0{,}53 \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2}} = 60\ \mathrm{W}$$

$$A = \frac{P}{\sigma T^4} = \frac{60\ \mathrm{W}}{5{,}67 \cdot 10^{-8}\ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2K^4}} \cdot (5 \cdot 10^3\ \mathrm{K})^4} = 1{,}7 \cdot 10^{-6}\ \mathrm{m^2} = 1{,}7\ \mathrm{mm^2}$$

1P: Berechnung der Leistung

3P: Formel für A

2P: Endergebnis

Aufgabe 6: System mit zwei Observablen

Ein System besitzt bezüglich der Observablen A die beiden Eigenzustände ψ_1 und ψ_2 und bezüglich der Observablen B die Eigenzustände ϕ_1 und ϕ_2. Es gilt:

$$\psi_1 = a\phi_1 + b\phi_2$$
$$\psi_2 = b\phi_1 - a\phi_2$$

mit $a^2 + b^2 = 1$

a) Stellen Sie die Eigenzustände ϕ_1 und ϕ_2 als Funktion von ψ_1 und ψ_2 dar. **2P**

b) Die Observable A wird gemessen und man erhält den Eigenwert zu ψ_1. Danach wird B gemessen. Wie groß sind dabei die Wahrscheinlichkeiten, die Eigenzustände ϕ_1 bzw. ϕ_2 zu erhalten? **4P**

c) Direkt nach der Messung von B wird wieder A gemessen. Mit welcher Wahrscheinlichkeit wird nun der Eigenwert zu ψ_2 gemessen? **4P**

Lösung

a)

$$\phi_1 = a\psi_1 + b\psi_2$$

$$\phi_2 = b\psi_1 - a\psi_2$$

2P: Für die Aufstellung der Gleichungen

b)

Die Wahrscheinlichkeit ϕ_1 zu erhalten ist

$$|\langle\phi_1|\psi_1\rangle|^2 = |\langle\phi_1|a\phi_1 + b\phi_2\rangle|^2 = a^2$$

Die Wahrscheinlichkeit ϕ_2 zu erhalten ist

$$|\langle\phi_2|\psi_1\rangle|^2 = |\langle\phi_2|a\phi_1 + b\phi_2\rangle|^2 = b^2$$

4P: Je 2P pro Formel

c)

Die Wahrscheinlichkeit ψ_2 zu erhalten ist

$$a^2\,|\langle\psi_2|\phi_1\rangle|^2 + b^2\,|\langle\psi_2|\phi_2\rangle|^2 =$$

$$a^2\,|\langle\psi_2|a\psi_1 + b\psi_2\rangle|^2 + b^2\,|\langle\psi_2|b\psi_1 - a\psi_2\rangle|^2 = a^2b^2 + b^2a^2 = 2a^2b^2$$

2P: für Ansatz
2P: für Endergebnis

Aufgabe 7: Unendlich hohe Potentialschwelle

Ein Teilchen der Masse m mit der kinetischen Energie E bewegt sich in positive x-Richtung auf eine unendlich hohe Potentialschwelle bei $x = 0$ zu.

a) Stellen Sie die zeitunabhängige Schrödinger-Gleichung für das Teilchen für $x < 0$ auf und geben Sie die allgemeine Lösung an **4P**

b) Wie lautet die Randbedingung bei $x = 0$? Geben Sie nun die Lösung der Schrödinger-Gleichung unter Berücksichtigung der Randbedingung an. **2P**

c) Skizzieren Sie die Aufenthaltswahrscheinlichkeit des Teilchens. **2P**

d) In welchem Abstand x_{min} von der Potenzialschwelle befindet sich das erste Minimum der Aufenthaltswahrscheinlichkeit? **2P**

Lösung

a)

$$-\frac{\hbar^2}{2m}\frac{\partial^2}{\partial x^2}\,\psi(x) = E\,\psi(x)$$

2P : Aufstellung der Schrödinger-Gleichung

$$\psi(x) = Ae^{+ikx} + Be^{-ikx}$$

mit $k = \sqrt{2mE}/\hbar$

2P: Lösung (1P wenn nur die hinlaufende Welle auftaucht)

b)

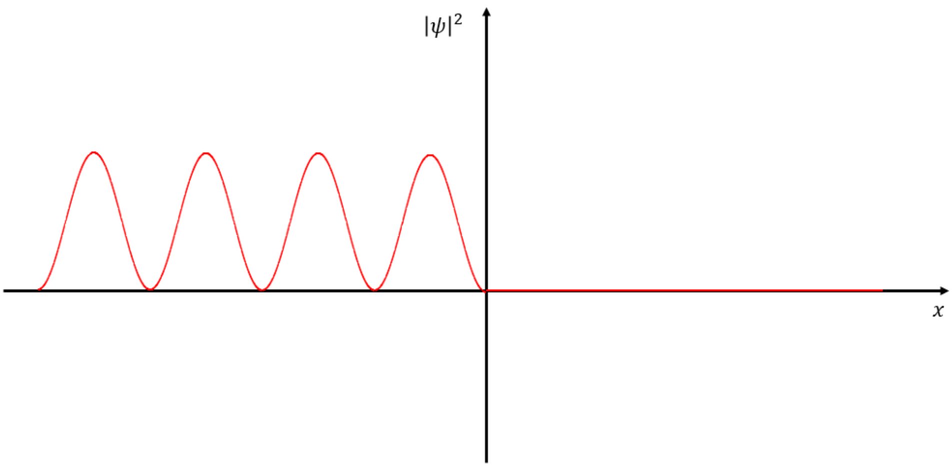
$$\psi(0) = 0$$

1P (es genügt nicht die allg, Angabe von Stetigkeit bei $x = 0$.)

$$\psi(x) = A\sin kx$$

1P

c)



1P: Prinzipielle Form wie $sin^2(x)$

1P: Richtige Randbedingung und Verlauf bei $x > 0$

c)

Stehende Welle, erstes Minimum bei $x = -\lambda/2$

$$x = -\frac{\lambda}{2} = -\frac{\pi}{k} = -\pi\sqrt{\frac{\hbar^2}{2mE}} = -\frac{\pi\hbar}{\sqrt{2mE}}$$

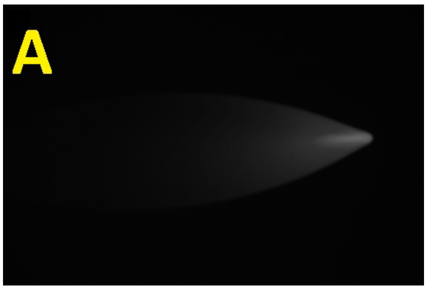
2P: Berechnung des Minimums

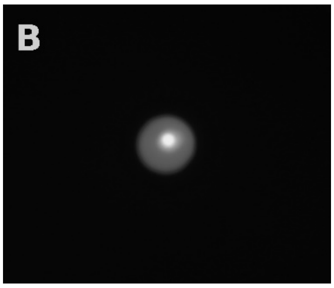
Aufgabe 8: Bildfehler

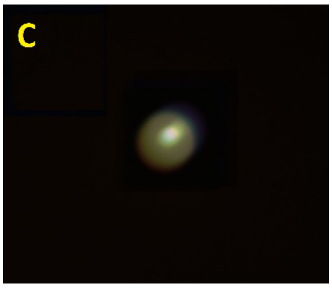
Die fünf Abbildungen zeigen den Einfluss unterschiedlicher Bildfehler auf einen Bildpunkt bzw. ein ausgedehntes Objekt. Ordnen Sie die Buchstaben auf den Fotos dem jeweils dominanten Bildfehler zu:

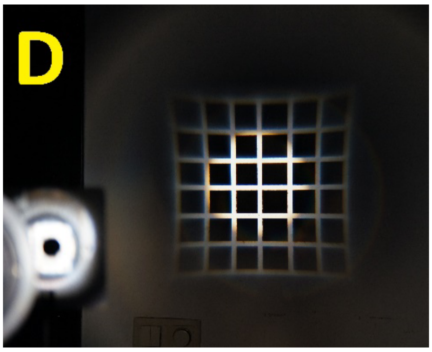
je 1P

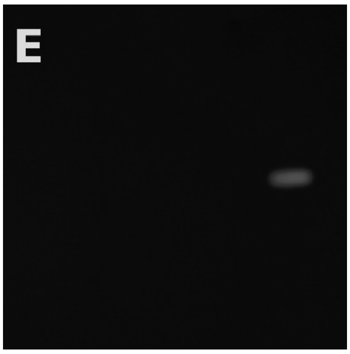
Astigmatismus	**E**
Koma	**A**
Sphärische Aberration	**B**
Chromatisch Aberration	**C**
Verzeichnung	**D**











Aufgabe 9: Prinzipien der Optik

Kreuzen Sie an (mehrere richtige Antworten pro Teilaufgabe sind möglich) **je 1P**

a) Das Fermat'sche Prinzip gilt

- ☒ in homogenen Medien.
- ☒ in optisch dichten Medien.
- ☒ in optisch dünnen Medien.
- ☒ im Vakuum.

b) Totalreflexion kann auftreten

- ☒ beim Übergang von einem optisch dichten in ein dünneres Medium.
- ☐ beim Übergang von einem optisch dünnen in ein dichteres Medium.
- ☐ im Inneren einen homogenen Mediums.
- ☐ im Vakuum.

c) Nichtlineare Effekte

- ☐ treten in der Optik nicht auf.
- ☐ treten auch im Vakuum auf.
- ☒ erzeugen höhere Frequenzen beim Durchgang von Licht durch ein Medium.
- ☒ können die Polarisation eines Lichtstrahls verändern.

d) Das Babinet'sche Prinzip besagt, dass die Beugungsbilder zueinander komplementärere Blenden außerhalb des Bereiches, der durch die geometrische Abbildung beleuchtet wird

- ☐ dunkel sind.
- ☐ hell sind.
- ☒ gleich sind.
- ☐ komplementär sind.

e) Zeitliche Kohärenz ist gegeben bis

- ☐ $\Delta t \cdot \Delta\lambda \approx 1$.
- ☒ $\Delta t \cdot \Delta f \approx 1$.
- ☐ $\Delta t \cdot \Delta E \approx \hbar$.
- ☐ $\Delta f \cdot \Delta\lambda \ll c$.