*Klausur unter Abiturbedingungen*

**Thema:** *Modellvorstellungen zum Verhalten von Licht oder Elektronen*

## Aufgabe 1

Abb.1 (siehe Material) zeigt die bekannte Interferometeranordnung nach Michelson. Einer der beiden Reflexionsspiegel wurde durch eine an einem Faden aufgehängte, *oberflächenverspiegelte* Weihnachtskugel ersetzt. An Stelle des Auffangschirms befindet sich ein Fototransistor (siehe Material), der über einen Verstärker an einen Lautsprecher angeschlossen ist.

Die Kugel wird mit kleinen Amplituden (einige Millimeter) senkrecht zur Achse *„fester Spiegel - Fototransistor"* in Schwingungen versetzt. Wenn sich die Kugel in der Nähe der Umkehrpunkte bewegt, hört man einen „Jaulton"; dieser hält umso länger an, je kleiner die Amplitude wird.

1.1 Beschreibe und erläutere die Funktionsweise dieses Interferometers!
Deute die Beobachtungen dieses Versuchs!

1.2 In dem gehörten „Jaulton" kommt unter anderen die Frequenz $f = 1\,kHz$ vor.
Bestimme die dazugehörige Momentangeschwindigkeit der Kugel und erläutere dein Vorgehen! [$\lambda_{Laser} \approx 632{,}8\,nm$]

1.3 Bestimme die Amplitude, mit der das Kugelpendel schwingen muss, damit beim Durchgang durch die Ruhelage die Geschwindigkeit $v = 0{,}5\,\frac{mm}{s}$ erreicht wird!

1.4 Der Versuch soll in folgender Weise geändert werden:
Bei arretierter Kugel wird zwischen dem festen Spiegel und der Strahlenteilerplatte eine $x = 5\,cm$ lange, evakuierte Kammer in den Strahlengang gestellt. Der Lautsprecher wird gegen einen Impulszähler ausgetauscht. Beim Einströmen von Luft in die Kammer werden vom Zählgerät Impulse registriert. Nach der vollständigen Füllung der Kammer mit Luft beträgt die Impulsanzeige $k = 43$ Impulse.
Für die Brechzahl von Luft gilt: $n = 1 + \frac{k \cdot \lambda_{Laser}}{2 \cdot x}$.
Bestimme die Brechzahl von Luft und leite die angegebene Formel begründet her! [$\lambda_{Laser} = 632{,}8\,nm$ (im Vakuum) ]

## Aufgabe 2

Mit Hilfe der Bragg-Reflexion an einem Lithiumfluoridkristall mit der Gitterkonstanten $d = 201\,pm$ werden bei verschiedenen fest eingestellten Beschleunigungsspannungen $U_A$ einer Röntgenröhre die Glanzwinkel $\alpha$ gemessen, zu denen die kürzeste emittierte Wellenlänge gehört. Die Messergebnisse sind in Tab.1 (siehe Material) dargestellt.

2.1 Aus der Theorie der Bragg-Reflexion und der Intensitätsmessung der Röntgenstrahlung einer Röntgenröhre in Abhängigkeit von der Wellenlänge $\lambda$ der emittierten Strahlung bei verschiedenen Beschleunigungsspannungen $U_A$ ergibt sich die Möglichkeit, den gemessenen Winkel $\alpha$ mit folgender Formel zu berechnen: $\alpha = \arcsin(\frac{h \cdot c}{2 \cdot e \cdot d \cdot U_A})$.
Leite diese Formel begründet her!
Erläutere, warum der berechnete Wert immer kleiner als der gemessene Wert ist (Tab.1).

2.2 Berechne mit der Bragg-Gleichung die Frequenzen zu den in der Tabelle Tab.1 angegebenen Winkeln und bestimme mit Hilfe deines GTR die Abhängigkeit der Elektronenenergie $e \cdot U_A$ von der dazugehörenden Frequenz der emittierten Röntgenphotonen!
Skizziere die grafische Darstellung und gib die gefundene Abhängigkeit in Form einer physikalischen Gleichung an!

2.3 Berechne die de-Broglie-Wellenlänge eines mit $U_A = 10\ kV$ beschleunigten Elektrons und die Wellenlänge des Röntgenquants, das bei vollständiger Absorption der kinetischen Elektronenenergie emittiert wird!
Vergleiche deine Ergebnisse und deute deine Feststellung!

## Aufgabe 3

Abb.3 (siehe Material) zeigt drei Aspekte des Doppelspaltversuchs mit Licht oder Elektronen. Mit Abb.4 werden die Modelle zur Beschreibung von Quantenobjekten auf unsere Erfahrungswelt übertragen.

3.1 Erkläre in Abb.3 mit Hilfe der *Modellvorstellungen zum Verhalten von Licht oder Elektronen* das Zustandekommen von Maxima und Minima!
Erläutere, warum nicht nur ein Model zur Erklärung herangezogen werden kann!

3.2 Berechne den Abstand des nullten vom ersten Maximum für Licht der Wellenlänge $\lambda = 600\ nm$, den Spaltabstand $g = 0{,}1\ mm$ und die Entfernung Spalt-Schirm $e = 3\ m$!
Erläutere die sich hier bewährende Modellvorstellung!

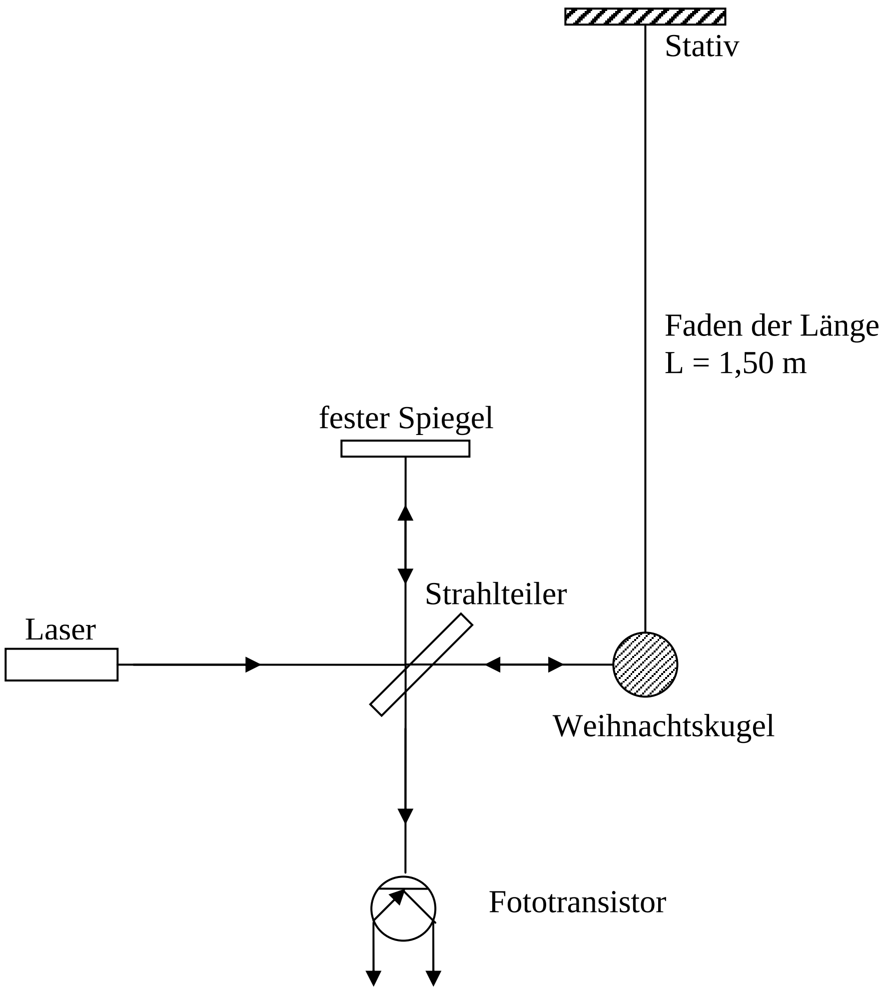
3.3 Licht der Wellenlänge $\lambda = 3{,}6 \cdot 10^{-7}\ m$ trifft auf Caesium, für das die Austrittsarbeit $W_A = 1{,}94\, eV$ beträgt.
Berechne den Impuls der Photonen und die Geschwindigkeit der schnellsten Elektronen!
Erläutere die sich hier bewährende Modellvorstellung!

3.4 Erläutere im Zusammenhang mit dem Doppelspaltversuch das „Komplementaritätsprinzip“ und die Zusammenfassung und Ergänzung bisheriger Modellvorstellungen zum Modell der Quantenmechanik!

3.5 Beschreibe, was in Abb.4 durch die fünf Gazellen dargestellt werden soll!
Die Masse einer Gazelle sei $m \approx 20\,kg$, ihre Geschwindigkeit $v \approx 20\frac{m}{s}$.
Entscheide begründet, ob der Baumabstand $g \approx 5m$ für die dargestellte Beobachtung geeignet ist!

## Material zur Aufgabe 1

**Abb.1**




### **Fadenpendel** (aus der Formelsammlung)

Für kleine Amplituden schwingt ein Fadenpendel harmonisch; es gelten also das

Zeit-Weg-Gesetz: $s(t) = \hat{s} \cdot \cos(\omega \cdot t)$, das

Zeit-Geschwindigkeit-Gesetz: $v(t) = \dot{s}(t) = -\omega \cdot \hat{s} \cdot \sin(\omega \cdot t) = -\hat{v} \cdot \sin(\omega \cdot t)$ und das

Zeit-Beschleunigung-Gesetz: $a(t) = \dot{v}(t) = -\omega^2 \cdot \hat{s} \cdot \cos(\omega \cdot t) = -\hat{a} \cdot \cos(\omega \cdot t)$.

Für die Schwingungsdauer gilt $T = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{L}{g}} = \frac{1}{f}$.

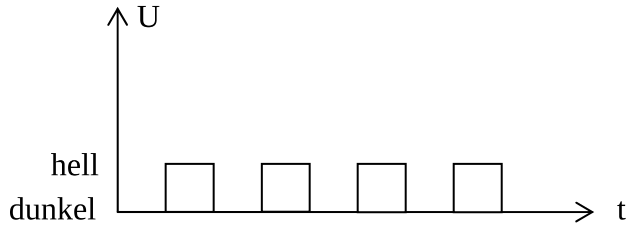
Für die Kreisfrequenz (Winkelgeschwindigkeit) gilt: $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ .

$f$ ist die Schwingungsfrequenz, $L$ die Fadenlänge und $g = 9{,}81 \frac{m}{s^2}$ der Ortsfaktor.

## Fototransistor

Der Fototransistor registriert die Intensität des einfallenden Lichts. Bei einem Wechsel zwischen dunkel und hell wird ein Spannungsimpuls erzeugt, der zum Ton im Lautsprecher bzw. zum Impuls im Impulszähler führt.

**Abb.2**




## Material zur Aufgabe 2

**Tab.1**

| $U_A / kV$ | 10 | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $\alpha / °$ | 18,2 | 15,1 | 12,8 | 11,3 | 10,1 | 9,2 |

## Material zur Aufgabe 3

**Abb.3**

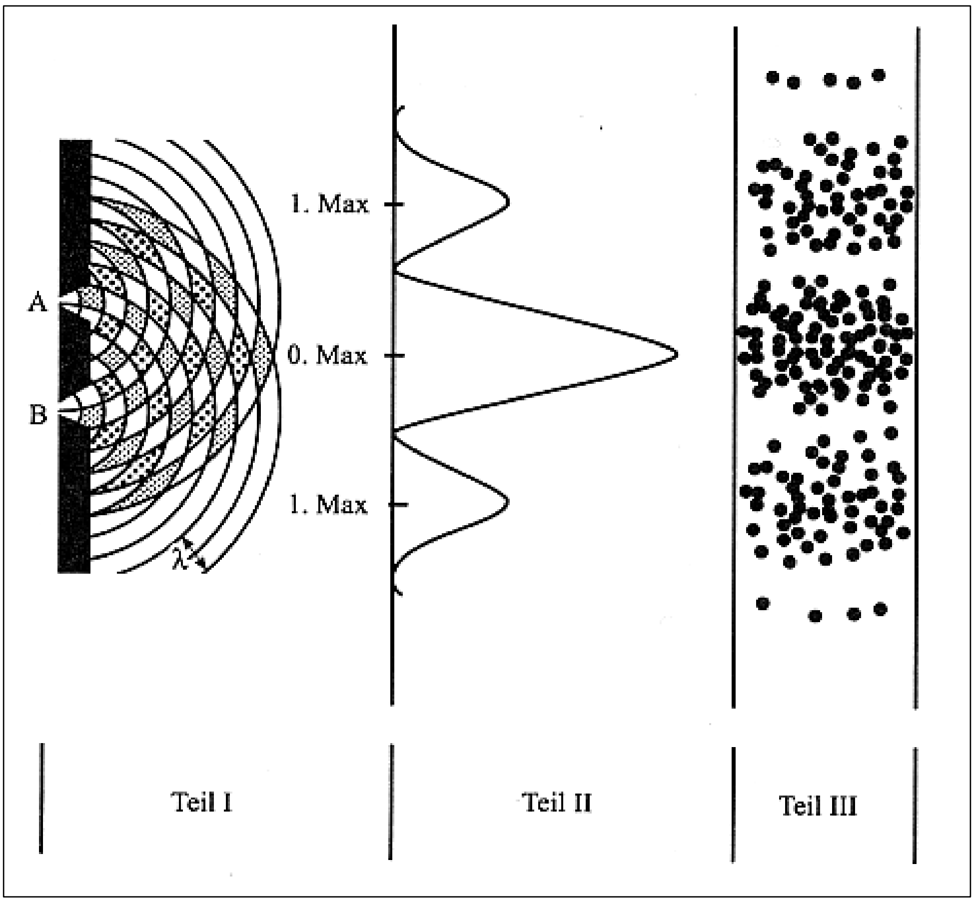


**Abb.4**

# Lösungen

## Aufgabe 1

1.1 Beschreibe und erläutere die Funktionsweise dieses Interferometers! Deute die Beobachtungen dieses Versuchs!

Der Laser sendet ein schmales paralleles Lichtbündel auf den Strahlenteiler. An seiner metallbedampften Oberfläche wird ein Teil von ihm am festen Ende mit Phasensprung von $\pi$ nach oben zum festen Spiegel reflektiert. An ihm tritt bei der anschließenden Reflexion nach unten wieder ein Phasensprung von $\pi$ auf. Der Strahl geht durch den Strahlenteiler hindurch und fällt auf den Fototransistor. Der vom Laser kommende Strahl geht aber zum Teil auch durch den Strahlenteiler hindurch und trifft auf die Oberfläche der Weihnachtskugel. Dort wird der Strahl mit einem Phasensprung von $\pi$ wieder zum Strahlenteiler zurückreflektiert, wo eine erneute Reflexion im Inneren des Strahlenteilers am losen Ende ohne Phasensprung zum Fototransistor erfolgt. Auf dem Weg vom Strahlenteiler zum Fototransistor interferieren zwei gleichläufige Wellen miteinander.
Bewegt sich nun die Weihnachtskugel, so verkürzt oder verlängert sich der Weg des Lichtanteils, der vom Strahlenteiler zur Kugel verläuft; es entsteht ein sich verändernder zusätzlicher Gangunterschied zwischen den interferierenden Lichtbündeln. Demzufolge verschieben sich die Interferenzstreifen oder –ringe auf der Eintrittsfläche des Fototransistors und es kommt zu Hell-Dunkel-Schwankungen, die der Transistor in einen „Jaulton“ umsetzt. Erfolgt die Bewegung der Kugel zu schnell, hat der Jaulton eine zu hohe Frequenz, um wahrgenommen werden zu können. Deshalb hört man ihn in den Bereichen, in denen sich die Kugel langsam bewegt – und das ist in den Bereichen der Umkehrpunkte der Fall.

1.2 In dem gehörten „Jaulton“ kommt unter anderen die Frequenz $f = 1\ kHz$ vor. Bestimme die dazugehörige Momentangeschwindigkeit der Kugel und erläutere dein Vorgehen! [$\lambda_{Laser} \approx 632,8\,nm$]

Der Frequenz von $f = 1\ kHz$ entsprechen am Ort des Fototransistors 1000 Hell-Dunkel-Wechsel. Jedem Hell-Dunkel-Wechsel entspricht die Veränderung des Gangunterschieds um eine Wellenlänge $\lambda$. Hierzu muss der Spiegel um $\frac{1}{2}\lambda$ verschoben werden. Der Tonfrequenz von $f = 1\ kHz$ entspricht also eine Verschiebung der Kugel um eine Strecke von $500 \cdot \lambda$ in einer Sekunde. Mit der Wellenlänge von $\lambda_{Laser} \approx 632,8\,nm$ ergibt sich: $v = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{500 \cdot \lambda_L}{1s} \approx 0,3164\ \frac{mm}{s}$.

1.3 Bestimme die Amplitude, mit der das Kugelpendel schwingen muss, damit beim Durchgang durch die Ruhelage die Geschwindigkeit $v = 0,5\ \frac{mm}{s}$ erreicht wird!

Die angegebene Geschwindigkeit ist $\hat{v}$ für die harmonische Schwingung eines Fadenpendels. Es gilt: $\hat{v} = \omega \cdot \hat{s} = \frac{2\pi}{T} \cdot \hat{s}$ (siehe Material). Mit $T = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{L}{g}}$ und $L = 1,50\,m$ folgt: $\hat{s} = \hat{v} \cdot \sqrt{\frac{L}{g}} \approx 0,2\,mm$. Mit dieser Amplitude muss das Pendel also schwingen.

1.4 Der Versuch soll in folgender Weise geändert werden:
Bei arretierter Kugel wird zwischen dem festen Spiegel und der Strahlenteilerplatte eine $x = 5\,cm$ lange, evakuierte Kammer in den Strahlengang gestellt. Der Lautsprecher wird gegen einen Impulszähler ausgetauscht. Beim Einströmen von Luft in die Kammer werden vom Zählgerät Impulse registriert. Nach der vollständigen Füllung der Kammer mit Luft beträgt die Impulsanzeige $k = 43$ Impulse.
Für die Brechzahl von Luft gilt: $n = 1 + \frac{k \cdot \lambda_{Laser}}{2 \cdot x}$.
Bestimme die Brechzahl von Luft und leite die angegebene Formel begründet her!

[ $\lambda_{Laser} = 632,8\,nm$ (im Vakuum) ]

Für die Brechzahl von Luft ergibt sich: $n = 1 + \frac{43 \cdot 632,8 \cdot 10^{-9} m}{2 \cdot 0,05 m} \approx 1,000272104$.

Durch die Kammer läuft der Lichtstrahl 2 mal. Ist sie evakuiert, so passen $z \in R$ Vakuum-Wellenlängen in die Gesamtstrecke $2x$, also gilt: $2x = z \cdot \lambda_{Laser} \Leftrightarrow \lambda_{Laser} = \frac{2x}{z}$. Ist die Kammer vollständig mit Umgebungsluft des Brechungsindex $n$ gefüllt, so passen mehr n-Wellenlängen in die Strecke $2x$, also gilt: $2x = (z+k) \cdot \lambda_n \Leftrightarrow \lambda_n = \frac{2x}{z+k}$. Das Brechungsgesetz lautet: $n = \frac{\lambda_{Laser}}{\lambda_n}$. Setzt man die oberen Beziehungen ein, so ergibt sich: $n = \frac{2x \cdot (z+k)}{z \cdot 2x} = 1 + \frac{k}{z}$. Mit $z = \frac{2x}{\lambda_{Laser}}$ folgt: $n = 1 + \frac{k \cdot \lambda_{Laser}}{2 \cdot x}$.

## Aufgabe 2

2.1 Aus der Theorie der Bragg-Reflexion und der Intensitätsmessung der Röntgenstrahlung einer Röntgenröhre in Abhängigkeit von der Wellenlänge $\lambda$ der emittierten Strahlung bei verschiedenen Beschleunigungsspannungen $U_A$ ergibt sich die Möglichkeit, den gemessenen Winkel $\alpha$ mit folgender Formel zu berechnen: $\alpha = \arcsin(\frac{h \cdot c}{2 \cdot e \cdot d \cdot U_A})$. Leite diese Formel begründet her! Erläutere, warum der berechnete Wert immer kleiner als der gemessene Wert ist (Tab.1).

Für die Bragg-Reflexion gilt die Beziehung: $k \cdot \lambda = 2 \cdot d \cdot \sin(\alpha)$. Will man die kleinste Wellenlänge beobachten, muss mit $\alpha = 0°$ begonnen werden, es ist also $k = 1$ zu wählen. Somit gilt: $\lambda_{\min} = 2 \cdot d \cdot \sin(\alpha)$. Die kleinste Wellenlänge der Röntgenstrahlung ergibt sich dann, wenn die gesamte kinetische Energie des Elektrons in Strahlungsenergie umgesetzt wird: $e \cdot U_A = h \cdot \frac{c}{\lambda_{\min}} \Leftrightarrow \lambda_{\min} = \frac{h \cdot c}{e \cdot U_A}$. Gleichsetzen liefert: $2 \cdot d \cdot \sin(\alpha) = \frac{h \cdot c}{e \cdot U_A} \Leftrightarrow \alpha = arc\sin(\frac{h \cdot c}{2 \cdot d \cdot e \cdot U_A})$.
Die kurzwellige Grenze der Röntgenstrahlung beginnt plötzlich bei einer kleinsten Wellenlänge. Das Bremsspektrum, d.h. die Intensitätskurve steigt dann steil an, so dass die genaue Grenze beim Ausmessen in der Regel etwas überschritten werden muss und damit ein etwas zu großer Winkel gemessen wird. Man kann diesen Zusammenhang an der Bragg-Gleichung sehen: $\lambda_{\min} = 2 \cdot d \cdot \sin(\alpha)$. da man erst eine Intensität messen kann, wenn $\lambda_{\min}$ bereits überschritten ist, ist der Winkel auch immer etwas zu groß (Monotonie der Sinusfunktion in diesem Bereich).

2.2 Berechne mit der Bragg-Gleichung die Frequenzen zu den in der Tabelle Tab.1 angegebenen Winkeln und bestimme mit Hilfe deines GTR die Abhängigkeit der Elektronenenergie $e \cdot U_A$ von der dazugehörenden Frequenz der emittierten Röntgenphotonen! Skizziere die grafische Darstellung und gib die gefundene Abhängigkeit in Form einer physikalischen Gleichung an!

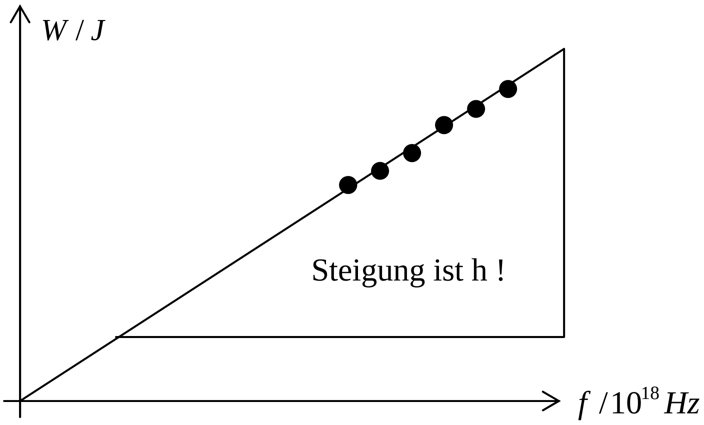
Aus der Bragg-Gleichung folgt: $\frac{c}{f} = 2 \cdot d \cdot \sin(\alpha) \Leftrightarrow f = \frac{c}{2 \cdot d \cdot \sin(\alpha)}$. Die berechneten Werte sind:

| $U_A / kV$ | 10 | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $f / 10^{18} Hz$ | **2,3877** | **2,8627** | **3,3661** | **3,8059** | **4,2525** | **4,6644** |
| $\alpha / °$ | 18,2 | 15,1 | 12,8 | 11,3 | 10,1 | 9,2 |

Gibt man die Frequenzen in die x-Liste und die Energie $e \cdot U_A$ in die y-Liste ein, so erhält man die lineare Regression:

$y = 7,005239 \cdot 10^{-34} \cdot x - 8,81484 \cdot 10^{-17}$ .

Umgesetzt in physikalische Größen heißt dies: $W = e \cdot U_A = 7,005239 \cdot 10^{-34}\ Js \cdot f - 8,81484 \cdot 10^{-17}\ J$ . Den zweiten Term kann man vernachlässigen, da er eigentlich null sein müsste. Es wird keine Elektronenenergie umgesetzt, wenn keine Strahlung emittiert wird: $f = 0 \Rightarrow U_A = 0$ . Der Nullpunktsfehler ergibt sich aus der Regressionsmathematik und aus Messungenauigkeiten. Die Abhängigkeit lautet also: $W = e \cdot U_A = h \cdot f$ ; h ist die Planck-Konstante.




2.3 Berechne die de-Broglie-Wellenlänge eines mit $U_A = 10\ kV$ beschleunigten Elektrons und die Wellenlänge des Röntgenquants, das bei vollständiger Absorption der kinetischen Elektronenenergie emittiert wird! Vergleiche deine Ergebnisse und deute deine Feststellung!

Für die de-Broglie-Wellenlänge gilt: $\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{m \cdot v} = \frac{h}{m \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot e \cdot U_A}{m}}} = \frac{h}{\sqrt{2 \cdot e \cdot m \cdot U_A}} \approx 1,2264 \cdot 10^{-11} m$ .

Für das Röntgenquant gilt: $e \cdot U_A = h \cdot \frac{c}{\lambda} \Leftrightarrow \lambda = \frac{h \cdot c}{e \cdot U_A} \approx 1,2398 \cdot 10^{-10} m$ .

Die Ergebnisse stimmen nicht überein, denn das Elektron wird nicht in ein Quant gleicher Wellenlänge umgewandelt. Umgewandelt wird die kinetische Energie des Elektrons und nicht seine Gesamtenergie – das Elektron existiert auch noch nach der Auslösung des Röntgenquants als Elektron.

## Aufgabe 3

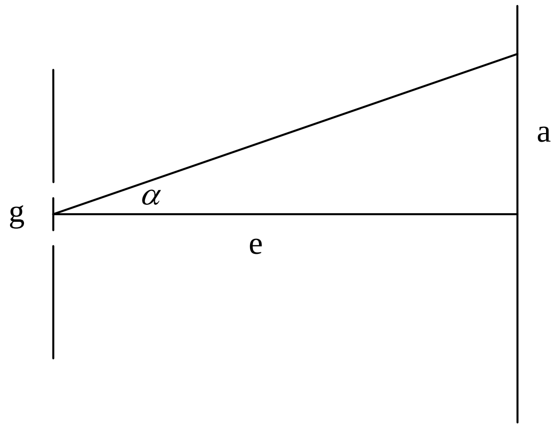
Abb.3 (siehe Material) zeigt drei Aspekte des Doppelspaltversuchs mit Licht oder Elektronen. Mit Abb.4 werden die Modelle zur Beschreibung von Quantenobjekten auf unsere Erfahrungswelt übertragen.

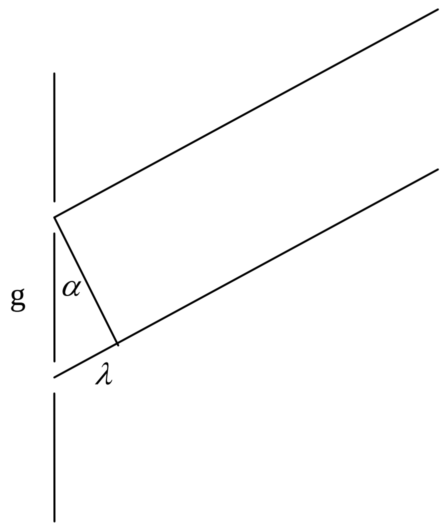
3.1 Erkläre in Abb.3 mit Hilfe der *Modellvorstellungen zum Verhalten von Licht oder Elektronen* das Zustandekommen von Maxima und Minima! Erläutere, warum nicht nur ein Model zur Erklärung herangezogen werden kann!

Im Teil I wird mit dem Huygensschen Prinzip die Überlagerung zweier Elementarwellen gezeigt, die in den beiden Spaltöffnungen bei Auftreffen einer ebenen Wellenfront entstehen. Sie breiten sich mit gleicher Geschwindigkeit und Wellenlänge aus und interferieren im Bereich hinter dem Doppelspalt. Treffen Wellenberge aufeinander, so addieren sich ihre Amplituden, trifft ein Wellenberg auf ein Wellental, so löschen sich die Wellen aus. Dieses Modell beschreibt das Verhalten von Wellen in Anlehnung an die Beobachtung von Wasserwellen. Elektronen oder Photonen können aber nicht als Wasserteilchen verstanden werden, da weder die Photonen noch die Elektronen schwingen. Dennoch haben sie Wellennatur und können interferieren wie die Wasserwellen.

In Teil II wird eine Intensitätsverteilung gezeigt. Sie beschreibt die Intensitätsverteilung der beobachteten Interferenzstreifen ebenso wie die Wahrscheinlichkeitsverteilung der auftreffenden Quantenobjekte.
Teil III stellt die Verteilung der einzelnen Quantenobjekte im Interferenzbild dar. An den Orten höchster Wahrscheinlichkeitsdichte sind die Maxima, an denen geringster Dichte die Minima. Dass die Struktur gekörnt ist, macht das Teilchenmodell erforderlich. Die Körnung lässt sich nicht mit dem Wellenmodell erklären, da eine Welle die Energie kontinuierlich verteilt und nicht diskret.

3.2 Berechne den Abstand des nullten vom ersten Maximum für Licht der Wellenlänge $\lambda = 600\ nm$, den Spaltabstand $g = 0{,}1\ mm$ und die Entfernung Spalt-Schirm $e = 3\ m$! Erläutere die sich hier bewährende Modellvorstellung!




Im Doppelspaltexperiment gilt: $\tan(\alpha) = \frac{a}{e}$ und $\sin(\alpha) = \frac{\lambda}{g}$.

$\Rightarrow a = e \cdot \tan(\arcsin(\frac{\lambda}{g})) \approx 1{,}8\,cm$. Hier bewährt sich das Wellenmodell des Lichts. Das Maximum 1. Ordnung liegt dort, wo der Gangunterschied der beiden Elementarwellen genau eine Wellenlänge beträgt.

3.3 Licht der Wellenlänge $\lambda = 3{,}6 \cdot 10^{-7}\ m$ trifft auf Caesium, für das die Austrittsarbeit $W_A = 1{,}94\,eV$ beträgt. Berechne den Impuls der Photonen und die Geschwindigkeit der schnellsten Elektronen! Erläutere die sich hier bewährende Modellvorstellung!

Für den Photonenimpuls gilt: $p = \frac{h}{\lambda} \approx 1{,}8406 \cdot 10^{-27}\ \frac{kgm}{s}$.

Die Gleichung des Fotoeffekts lautet: $h \cdot f = W_A + \frac{1}{2} m \cdot v^2$. Die schnellsten Elektronen haben die Geschwindigkeit

$v = \sqrt{\frac{2 \cdot (h \cdot \frac{c}{\lambda} - W_A)}{m}} \approx 7{,}2737 \cdot 10^5\ \frac{m}{s} \approx 0{,}2\% \cdot c$. Hier bewährt sich die Teilchenvorstellung. Das Photon wird wie ein Geschoss betrachtet, das ein Elektron aus dem Caesium herausschießt. Das Elektron bewegt sich als Teilchen mit einer bestimmten kinetischen Energie. Allerdings bleibt von dem Geschoss nach dieser Wechselwirkung nichts übrig.

3.4 Erläutere im Zusammenhang mit dem Doppelspaltversuch das „Komplementaritätsprinzip“ und die Zusammenfassung und Ergänzung bisheriger Modellvorstellungen zum Modell der Quantenmechanik!

Das Komplementaritätsprinzip besagt, dass sich die Information, durch welchen Spalt das Quantenobjekt gegangen ist, und die Entstehung eines Interferenzmusters gegenseitig ausschließen. Schickt man wie im Taylorversuch Quantenobjekte nacheinander durch den Doppelspalt und misst mit modernen elektronischen Hilfsmitteln an den beiden Spalten, ob ein Quantenobjekt hindurchgegangen ist oder nicht, so verschwindet die Interferenzfigur. Welcher Spalt von einem Quantenobjekt gewählt

wird, ist objektiv unbestimmt. Zerstört man diese Unbestimmtheit, wird das Experiment wesentlich verändert .
In der Quantenmechanik werden beide Modellvorstellungen zusammengefasst und durch Wahrscheinlichkeitsaussagen ergänzt. Quantenobjekte sind weder Teilchen noch Wellen, aber es gibt Situationen, in denen das Teilchenmodell oder das Wellenmodell eine gute Näherung darstellt. Das Verhalten von Quantenobjekten lässt sich nur mit Wahrscheinlichkeitsaussagen beschreiben. So ist z.B. die Intensitätsverteilung I(x) beim Doppelspalt proportional zur Wahrscheinlichkeitsverteilung der Objekte auf dem Schirm P(x). In der Quantenmechanik muss auf den strengen Determinismus der klassischen Physik verzichtet werden.

3.5 Beschreibe, was in Abb.4 durch die fünf Gazellen dargestellt werden soll! Die Masse einer Gazelle sei $m \approx 20\,kg$ , ihre Geschwindigkeit $v \approx 20\frac{m}{s}$. Entscheide begründet, ob der Baumabstand $g \approx 5m$ für die dargestellte Beobachtung geeignet ist!

Es gibt nur eine Gazelle, die aus dem „beugenden" Wald kommt. Die Gazelle entspricht einem Quantenobjekt, die Baumreihen der beugenden Struktur. Mit höchster Wahrscheinlichkeit tritt die Gazelle in mittlerer Position in Erscheinung (stärker gezeichnet), mit nach außen geringer werdender Wahrscheinlichkeit kann sie aber auch in den anderen schwächer gezeichneten Positionen wahrgenommen werden.
Aus der Masse und der Geschwindigkeit lässt sich der Impuls der Gazelle bestimmen:
$p = m \cdot v = 20kg \cdot 20\frac{m}{s} = 400\frac{kgm}{s}$ . Die de-Broglie-Wellenlänge beträgt dann: $\lambda = \frac{h}{p} \approx 1{,}65655 \cdot 10^{-36}\,m$. Der Spaltabstand $g \approx 5m$ ist also $\approx 3 \cdot 10^{36}$ mal größer als die Wellenlänge. Die Interferenzmaxima würden deshalb so dicht aneinander liegen, dass man sie nicht mehr als unterschiedliche Maxima (Antrefforte der Gazelle) beobachten könnte. Dieses Beispiel ist kein Widerspruch zur Quantenmechanik, sondern zeigt, das die klassische Physik ein Grenzfall der Quantenmechanik ist.