

**Aufgabe 1) zum Thema „Schwingungen und Wellen“**

**Hinweise für die Kurslehrkraft**

**Die Lehrkraft wählt zwei der Aufgaben 1) bis 4) aus. Die Schülerinnen und Schüler bearbeiten beide Aufgaben.**

**Aufgabe 1) darf mit jeder der drei anderen Aufgaben des Aufgabensatzes kombiniert werden.**

**Das nachfolgend beschriebene Experiment ist Grundlage der Aufgabe und soll vorgeführt werden. Den Schülerinnen und Schülern dürfen nur die Schülerversion der Aufgabe sowie die angegebenen Hilfsmittel ausgehändigt werden.**

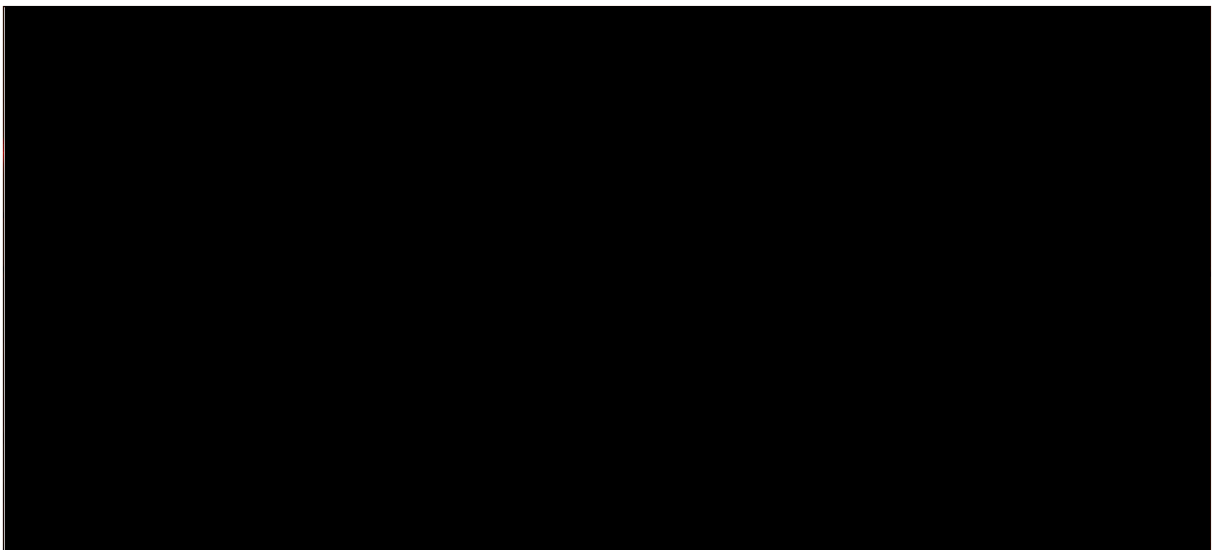
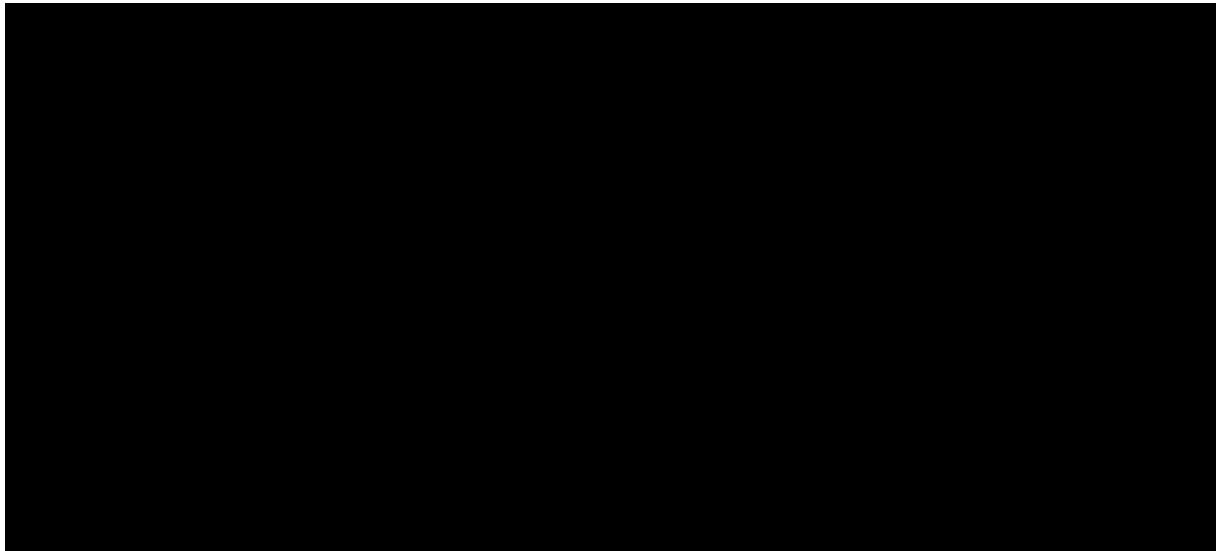


Abb. 1 und 2: möglicher Versuchsaufbau zu Versuch 1, Vorderansicht

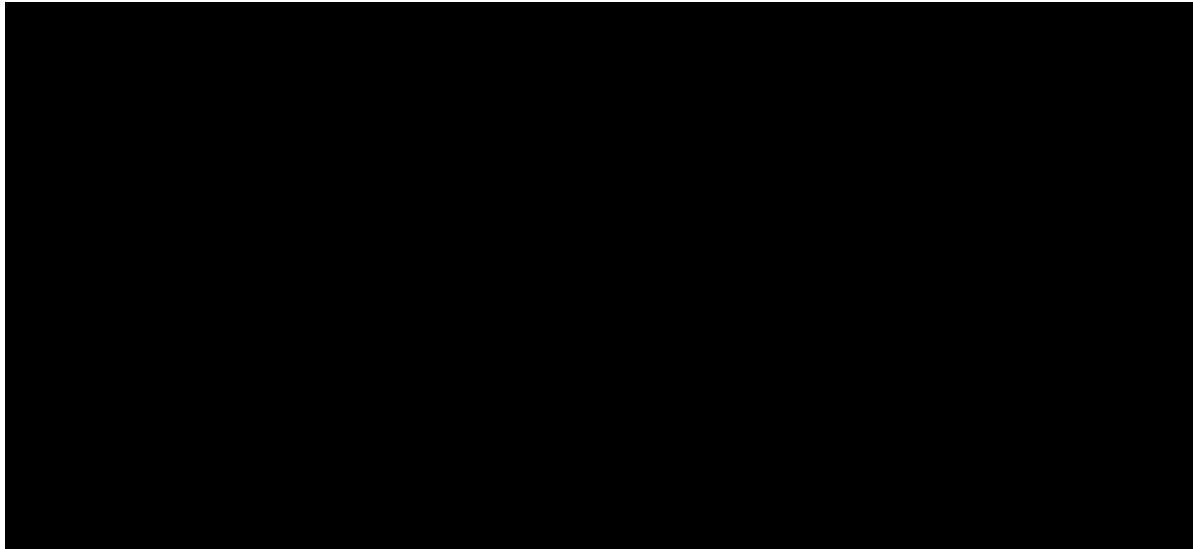


Abb. 3 (links): möglicher Versuchsaufbau zu Versuch 1, Seitenansicht

Abb. 4 (rechts): kreisbogenförmiges Maximum 1. Ordnung bei 4 m Entfernung; auf dem Schirm ist zur Verdeutlichung eine gerade schwarze Linie angebracht.

### Versuch 1

Ein Laser wird vor einer Wand bzw. einem großen weißen Schirm aufgebaut. Der Laserstrahl fällt annähernd orthogonal auf eine CD und trifft den Bereich, in dem die Tangente der Spuren vertikal verläuft. Der Auftreffpunkt liegt im inneren Bereich des beschriebenen Teils der CD, in dem die Spuren eine stärkere Krümmung aufweisen. Die CD wird leicht gekippt, so dass der reflektierte Strahl gerade nicht mehr in die Öffnung des Lasers zurückgeworfen wird, sondern exakt oberhalb der Mitte der Öffnung auf dem Schirm beobachtet werden kann. Man beobachtet dort weitere Lichterscheinungen, Maxima 1. und 2. Ordnung, die die Form eines Kreisbogens haben. Diese Form lässt sich deutlicher erkennen, wenn der Abstand zwischen CD und Wand auf 4 m vergrößert und auf dem Schirm eine gerade Linie angebracht wird. Der Versuch wird mit einer DVD wiederholt. Die Maxima 1. Ordnung rücken deutlich weiter vom Zentrum ab, Maxima 2. Ordnung treten nicht auf. Die Abstände zwischen CD bzw. DVD und Schirm sowie zwischen dem Maximum 0. Ordnung und den Maxima 1. bzw. 2. Ordnung werden gemessen und an der Tafel notiert.

Mögliche Angaben bzw. Messwerte sind:

Wellenlänge des Lasers: 633 nm

Abstand CD-Schirm: 1 m

Abstände vom mittleren Lichtreflex zu den äußeren Lichtreflexen

links außen	links innen	Mitte	rechts innen	rechts außen
CD:				
1,59 m	47 cm	0 cm	47,7 cm	1,64 m
DVD:				
---	1,67 m	0 cm	1,76 m	---

## Versuch 2

Vielen Spindeln mit CD-Rohlingen liegt eine transparente, nicht verspiegelte Scheibe bei, die Spuren im gleichen Abstand wie bei der CD aufweist. Eine solche Scheibe wird im folgenden Experiment verwendet. Das Zentrum der CD wird mit einer lichtundurchlässigen Kreisscheibe von ca. 8 cm Durchmesser abgeklebt.



Abb. 5: möglicher Versuchsaufbau zu Versuch 2

Aufbau: Experimentierlampe mit Kondensator, evtl. Kreisblende mit etwas mehr als 12 cm Durchmesser, transparente CD mit lichtundurchlässig abgeklebtem Zentrum, weißer Schirm. Großer Abstand Lampe – transparente CD (hier ca. 2 m); der Schirm befindet sich hinter der CD.

Durchführung: Der Kondensator wird so eingestellt, dass ein annähernd paralleles Lichtbündel auf die transparente CD fällt. Um eindrucksvollere Lichterscheinungen zu erhalten, kann das Lichtbündel mit einer Blende auf den Durchmesser der CD begrenzt werden; der Schattenwurf des CD-Randes sollte gerade noch sichtbar sein. Die Entfernung zwischen Schirm und CD wird von ca. 7 cm bis zu ca. 25 cm variiert.

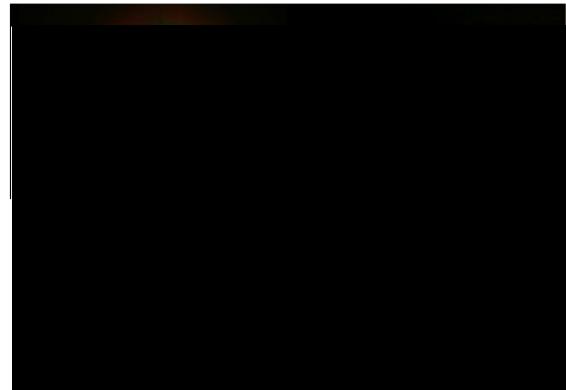
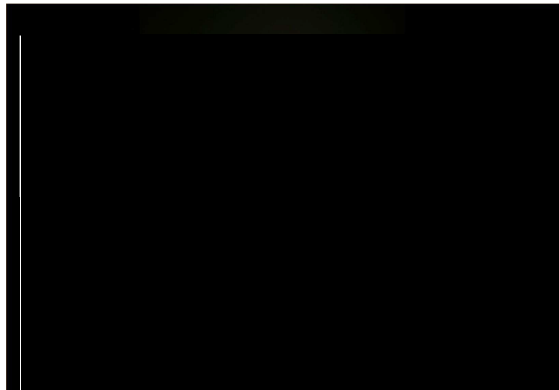


Abb. 6 geringer Abstand – Zentrum rot    Abb. 7 größerer Abstand – Zentrum blau

Beobachtung: Außer dem zu erwartenden Schattenwurf beobachtet man im Zentrum des Schattens eine helle, farbige Lichterscheinung. In Abhängigkeit von der Entfernung zwischen Schirm und CD beobachtet man bei geringem Abstand zunächst purpur, dann rot, mit zunehmendem Abstand dann gelb, grün, türkis, blau und violett. Diese Farberscheinungen gehen nicht immer direkt ineinander über, in bestimmten Abständen beobachtet man keine Farberscheinung bzw. Mischfarben.

Je nach Aufbau ist es möglich, dass ein Bild der Glühwendel beobachtet wird. Darauf soll im Kontext dieses Versuches nicht weiter eingegangen werden.

### **Aufgabe 1) Reflexion an einer CD bzw. einer DVD**

Eine CD besteht aus transparentem Polycarbonat und enthält im Innern eine verspiegelte Schicht mit einzelnen Vertiefungen (Pits), die in Reihen nebeneinander als spiralförmige Spur angebracht sind. Die CD reflektiert in den vertieften Reihen kaum Licht, wohl aber auf den Stegen (Lands) zwischen den Reihen.

Viele Spindeln mit CD-Rohlingen enthalten eine nicht verspiegelte, also transparente CD zum Schutz des untersten CD-Rohlings. Diese transparente CD ist genauso aufgebaut wie die verspiegelten. Eine solche transparente CD wird in Versuch 2 eingesetzt.

- a) Beschreiben Sie das erste vorgeführte Experiment (Versuch 1) incl. Skizze und erklären Sie die Entstehung des beobachteten Schirmbildes, ohne die Vorgänge zu mathematisieren.

(7 Rohpunkte)

- b) Berechnen Sie die Abstände der reflektierenden Stege auf CD und DVD an Hand der Messwerte aus dem Experiment. Leiten Sie die verwendeten Formeln unter Verwendung von Skizzen her und erläutern Sie Ihre Vorgehensweise.

Erklären Sie, warum bei der DVD die Interferenzmaxima 1. Ordnung weiter vom Zentrum entfernt liegen als bei der CD und warum bei der DVD Interferenzmaxima höherer Ordnung nicht entstehen.

Die Spiralspur auf der CD hat eine Länge von etwa 6 km. Die CD hat einen Radius von 60 mm, wobei die innere Kreisfläche mit  $r = 20$  mm unbeschrieben ist. Schätzen Sie mit diesen Informationen den Abstand der Spuren ab und vergleichen Sie diesen Wert mit dem Ergebnis der optischen Messung. Rechnen Sie mit einem mittleren Radius und begründen Sie die Zulässigkeit dieser Vorgehensweise.

(20 Rohpunkte)

- c) Die Interferenzmaxima sind Kreisbogenausschnitte. Erklären Sie die Entstehung dieser Form. Beschränken Sie sich dabei auf eine Seite des Interferenzbildes.

(4 Rohpunkte)

- d) Beschreiben Sie das zweite vorgeführte Experiment (Versuch 2) incl. Skizze und erklären Sie die Entstehung der je nach Abstand unterschiedlich farbigen Lichterscheinungen im Zentrum der Figur. (Es wird keine Rechnung erwartet.)

Hinweis: Das von der Lampe ausgesandte Lichtbündel ist annähernd parallel.

(9 Rohpunkte)

#### **Hilfsmittel:**

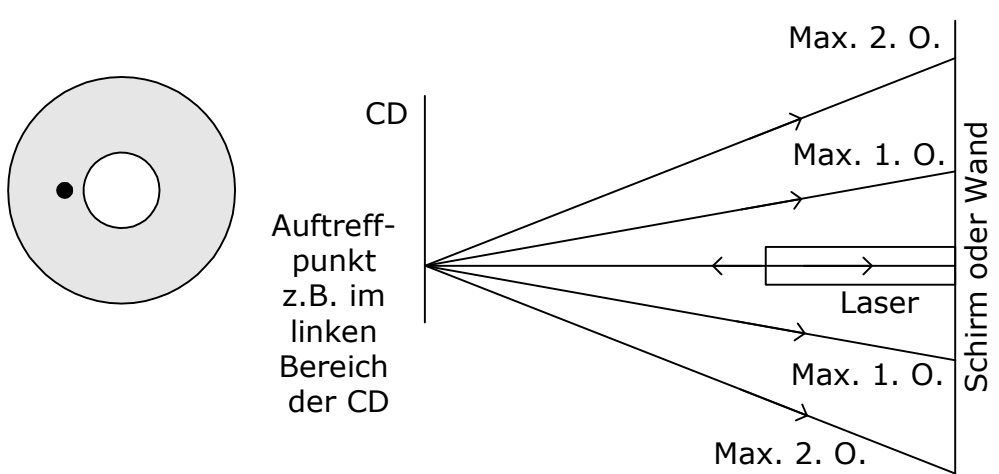
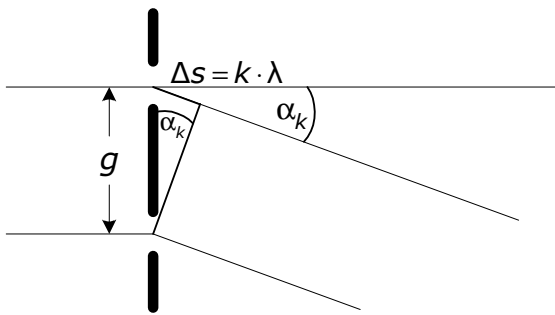
eingeführte Formelsammlung

nicht programmierbarer und nicht graphikfähiger Taschenrechner

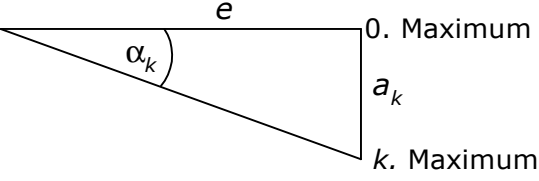
deutsches Wörterbuch

**Aufgabe 1) Reflexion an einer CD bzw. einer DVD**

**Erwartete Schülerleistungen und Bewertungskriterien**

Teilaufgabe	Erwartete Leistung	Punkte	
		maximal	erreicht
a)	<p>Beschreibung des Versuchsaufbaus: Laser, CD, Schirm / Wand</p>  <p>Auftreffpunkt z.B. im linken Teil der CD, bei der CD 5 Lichtreflexe auf dem Schirm, bei der DVD nur 3. mittlerer Reflex punktförmig, äußere Lichtreflexe länglich</p> <p>Interpretation als Interferenzversuch: reflektierende Stege wirken als Gitter, Beugung und Interferenz, reflektierter Strahl im Zentrum kann als Maximum 0. Ordnung interpretiert werden, die äußeren Lichtreflexe als Maxima 1. und 2. Ordnung.</p>	4	
b)	<p>Herleitung der Formel <math>\frac{\Delta s}{g} = \frac{a_k}{\sqrt{e^2 + a_k^2}}</math></p> <p>Skizze mit Größen, z.B. <math>g, a_k, d, k \cdot \lambda, \alpha_k</math></p> 	5	

Leistungskurs Physik  
Thema: Schwingungen und Wellen

	 <p>Formel umstellen: <math>g = \Delta s \cdot \frac{\sqrt{e^2 + a_k^2}}{a_k}</math></p> <p>andere Vorgehensweise denkbar, z. B. explizite Winkelberechnung rechnerische Auswertung</p> <p>z.B. Mittelwertbildung links und rechts, Berechnung für die 1. und für die 2. Ordnung ergibt mit den angegebenen Messwerten für die CD als Stegabstand <math>1,5 \cdot 10^{-6}</math> m und für die DVD <math>0,73 \cdot 10^{-6}</math> m.</p> <p>Die DVD hat engere Stegabstände. Deshalb liegen die Maxima 1. Ordnung weiter außen als bei der CD.</p> <p>Bei der DVD kommt kein Maximum 2. Ordnung zustande. Der Wert für <math>g</math> ist kaum größer als <math>\lambda</math>; der Term <math>\frac{1 \cdot \lambda}{g} = \sin \alpha</math> ist nur wenig kleiner als 1, der Winkel <math>\alpha</math> entsprechend groß. In der 2. Ordnung müsste der Gangunterschied <math>2 \cdot \lambda</math> größer sein als der geometrische Abstand <math>g</math> der beiden Wellenzentren; das ist nicht möglich.</p> <p>Ebenfalls zulässig ist eine mathematische Begründung: Wegen des Definitionsbereichs der Gleichung <math>\frac{2 \cdot \lambda}{g} = \sin \alpha</math> kann der Term <math>\frac{2 \cdot \lambda}{g}</math> nicht größer als 1 werden.</p> <p>Geometrische Betrachtung der Spiralspur</p> <p>Der Umfang einer Spirale ist <math>U = n \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_m</math>. Der mittlere Radius ist <math>r_m = \frac{1}{2} \cdot (20 \text{ mm} + 60 \text{ mm}) = 40 \text{ mm}</math>, die Anzahl <math>n</math> der Windungen ergibt sich aus <math>n = \frac{U}{2 \cdot \pi \cdot r_m} \approx \frac{6 \text{ km}}{2 \cdot \pi \cdot 40 \text{ mm}} \approx 23900</math>. Wenn ca. 23900 Spuren auf 40 mm liegen, ist der Abstand von Spurmitte zu Spurmitte ca. <math>\frac{40 \text{ mm}}{23900} \approx 1,68 \mu\text{m}</math>. Dieser Wert bestätigt die Berechnung aus der optischen Messung. Das Vorgehen ist wegen der Proportionalität von Radius und Umfang zulässig: Hat eine äußere Windung im Vergleich zum mittleren Umfang eine größere Länge, dann wird dies durch eine innere Windung mit kürzerer Länge exakt ausgeglichen.</p>	<p>4</p> <p>2</p> <p>4</p> <p>5</p>	
--	---	-------------------------------------	--

c)	<p>Erklärung der Form der Maxima z.B. auf der linken Seite</p> <p>Die Spuren auf der CD sind kreisbogenförmig.</p> <p>Der auftreffende Laserstrahl ist nicht punktförmig, sondern beleuchtet einen ausgedehnten Fleck auf der CD.</p> <p>Im oberen Teil der beleuchteten Spuren verläuft die Tangente nach oben rechts; die Wellenfronten werden orthogonal zur Tangente gebeugt, also nach oben links (und nach unten rechts).</p> <p>Im mittleren Teil der beleuchteten Spuren verläuft die Tangente vertikal; die Wellenfronten werden nach links (und rechts) gebeugt.</p> <p>Im unteren Teil der beleuchteten Spuren verläuft die Tangente nach oben links; die Wellenfronten (nach oben rechts und) nach unten links gebeugt.</p> <p>Auf diese Weise haben die Maxima 1. und 2. Ordnung die Form von Kreisbögen.</p> <p>Anmerkungen:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Diese Zeichnung dient nur zur Illustration und wird nicht vom Prüfling erwartet.</li> <li>2. Der Abstand zwischen CD und Schirm wurde mit ca. 4 m groß gewählt. Damit wird auch der Abstand <math>a_1</math> zwischen dem Max. 0. O. und dem Max. 1. O. wesentlich größer als der Krümmungsradius der CD-Spuren. Die Länge der kreisbogenförmigen Maxima ist im Gegensatz zu den Abmessungen in der Zeichnung in etwa gleich. Auch diese Überlegung wird nicht vom Prüfling erwartet.</li> </ol>	4
----	---	---

Leistungskurs Physik  
Thema: Schwingungen und Wellen

d)	<p>Beschreibung Aufbau, Beschreibung Durchführung / Beobachtung Schattenwurf, Lichtfleck im Zentrum, Farbe in Abhängigkeit vom Abstand: nah – rot, weit entfernt – violett.</p> <p>Erklärung Das Licht wird (u.a.) nach innen gebeugt; Licht bestimmter Wellenlänge* konvergiert in einem bestimmten Bereich auf der optischen Achse. Das Maximum 1. Ordnung für das rote Licht entsteht unter dem größten Beugungswinkel, deshalb beobachtet man den roten Fleck am nächsten an der CD. Die geringsten Ablenkwinkel ergeben sich für die kleinste Wellenlänge, also beim violetten Licht. Dieses konvergiert bei einem größeren Abstand des Schirms von der CD im Zentrum der Figur. In den Bereichen dazwischen ergeben sich Mischfarben.</p> <p>*Anmerkung: Licht bestimmter Wellenlänge, das in einem bestimmten Radius der CD gebeugt wird, konvergiert in einem Punkt der optischen Achse. Im selben Punkt konvergiert zugleich Licht einer anderen, leicht unterschiedlichen Wellenlänge, das an CD-Spuren mit einem etwas anderen Radius unter einem etwas größeren oder etwas kleineren Winkel gebeugt wird. Es treten also immer Mischfarben auf. Im Bereich nahe hinter der CD kommt blaues Licht aus dem Maximum 2. Ordnung hinzu, so dass sich in einem Bereich die Mischfarbe Purpur ergibt. Diese Überlegungen werden vom Prüfling jedoch nicht erwartet.</p>	5	
		4	
	Summe	40	



**Aufgabe 2) zum Thema Ladungen und Felder**

**Hinweise für die Kurslehrkraft**

**Die Lehrkraft wählt zwei der Aufgaben 1) bis 4) aus. Die Schülerinnen und Schüler bearbeiten beide Aufgaben.**

**Aufgabe 2) darf mit jeder der drei anderen Aufgaben des Aufgabensatzes kombiniert werden.**

**Die nachfolgende Aufgabe ist nicht mit der Durchführung eines Experimentes verbunden. Den Schülerinnen und Schülern dürfen nur die Schülerversion der Aufgabe sowie die angegebenen Hilfsmittel ausgehändigt werden.**

**Aufgabe 2) Millikan-Versuch:**

- a) Beschreiben Sie den Millikan-Versuch (Schwebemethode) an Hand einer Skizze.

(8 Rohpunkte)

- b) In einer modernen Variante wird der Millikan-Versuch mit gleich großen Kautschuk-Kügelchen der bekannten Masse  $m$  durchgeführt. Ergebnisse einer Messung finden Sie in der Tabelle (**Arbeitsmaterial**, siehe Anlage).

Berechnen Sie die Ladungen der Kügelchen, die bei der jeweiligen Spannung in Schwebelage gehalten werden. Leiten Sie die dafür benötigte Formel her.

Deuten Sie das Ergebnis unter Zuhilfenahme einer geeigneten grafischen Darstellung.

Ein Wissenschaftler deutet das Ergebnis der Messungen wie folgt:  
„Ladungen treten immer nur in Vielfachen einer Elementarladung der Größe  $0,8 \cdot 10^{-19} \text{ C}$  auf. Die Kautschukkügelchen tragen immer geradzahlige Vielfache der Elementarladung“.

Kommentieren Sie diese Aussage.

(15 Rohpunkte)

- c) Millikan hatte keine gleichartigen Kügelchen sehr geringer Masse zur Verfügung. Er verwendete Öltröpfchen unterschiedlicher Masse. Beschreiben und erläutern Sie eine Vorgehensweise zur Ermittlung der Masse dieser Tröpfchen. Leiten Sie die relevanten Formeln für Tröpfchenradius und Tröpfchenmasse her.

**Hinweis:** Eine Kugel mit dem Radius  $r$  erfährt bei einer Bewegung mit der Geschwindigkeit  $v$  durch ein Gas oder eine Flüssigkeit eine Reibungskraft  $F_r = 6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r \cdot v$ . Dabei beschreibt  $\eta$  die Zähigkeit (Viskosität) der Flüssigkeit oder des Gases.

(10 Rohpunkte)

Weiter auf der nächsten Seite

Leistungskurs Physik  
Thema: Ladungen und Felder

---

- d) Studenten werden vor die Aufgabe gestellt, weitere mögliche Versuche zu entwerfen, mit denen man die Elementarladung experimentell bestimmen kann. Folgende Idee wurde geäußert:

Analog zur Bestimmung der spezifischen Elektronenladung durch Ablenkung in einem Magnetfeld wird bei diesem Experiment die spezifische Wasserstoffionenladung  $\frac{e}{m_H}$  ermittelt. Für die Bestimmung von  $e$  aus  $\frac{e}{m_H}$  kann

man die Masse  $m_H$  von Wasserstoffatomen benutzen, die man aus der Beziehung von Avogadro ermittelt. 1 mol Wasserstoff enthält  $n_A$  Atome, wobei  $n_A$  die Avogadrozahl ist.

Fertigen Sie eine Skizze des Versuchsaufbaus zur Realisierung dieser Idee an und beschreiben Sie Messverfahren für die zu messenden Größen. Diskutieren Sie mögliche Probleme.

(7 Rohpunkte)

**Hilfsmittel:**

Formelsammlung,  
nichtprogrammierbarer Taschenrechner,  
deutsches Wörterbuch

**Anlage: Messwerttabelle zum Millikanversuch**

Versuchsdaten: Masse der Kügelchen  $m = 4 \cdot 10^{-15}$  kg; Plattenabstand 5 mm

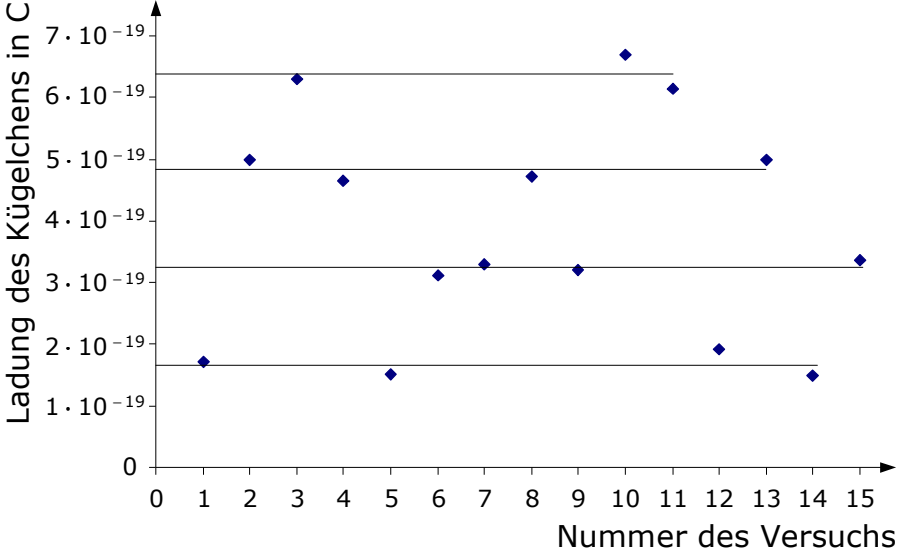
Versuchsnummer	Spannung $U$ in V	Ladung $Q$ in C
1	1141	
2	394	
3	312	
4	421	
5	1290	
6	631	
7	595	
8	417	
9	611	
10	292	
11	320	
12	1027	
13	394	
14	1317	
15	584	

**Aufgabe 2) Millikan-Versuch**

**Erwartete Schülerleistungen und Bewertungskriterien**

Teilaufgabe	Erwartete Leistung	Punkte																																																
		maximal	erreicht																																															
<b>a)</b> Skizze (Kondensator, regelbare Spannungsquelle, Polung, Tropfen mit Kraftvektoren, Mikroskop)  Durchführung: Ohne Spannung sinkt die Kugel auf Grund der Schwerkraft; nach Anlegen einer geeignet gepolten Spannung sinkt sie langsamer, schwebt oder steigt. Die Spannung wird so eingestellt, dass die Kugel schwebt. In dem Fall liegt Kräftegleichheit zwischen der Kraft im elektrischen Feld und der Schwerkraft vor.		4																																																
		4																																																
<b>b)</b> Formelherleitung $F_e = F_g \Rightarrow Q \cdot E = m \cdot g$ . Mit $E = \frac{U}{d}$ gilt $Q \cdot \frac{U}{d} = m \cdot g$ ; nach $Q$ aufgelöst $Q = \frac{m \cdot g \cdot d}{U}$ .  Berechnung der Ladungen (Tabelle)		5																																																
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Versuchs - nummer</th> <th>Spannung <math>U</math> in V</th> <th>Ladung <math>Q</math> in C</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>1141</td><td><math>1,72 \cdot 10^{-19}</math></td></tr> <tr><td>2</td><td>394</td><td><math>4,98 \cdot 10^{-19}</math></td></tr> <tr><td>3</td><td>312</td><td><math>6,29 \cdot 10^{-19}</math></td></tr> <tr><td>4</td><td>421</td><td><math>4,66 \cdot 10^{-19}</math></td></tr> <tr><td>5</td><td>1290</td><td><math>1,52 \cdot 10^{-19}</math></td></tr> <tr><td>6</td><td>631</td><td><math>3,11 \cdot 10^{-19}</math></td></tr> <tr><td>7</td><td>595</td><td><math>3,30 \cdot 10^{-19}</math></td></tr> <tr><td>8</td><td>417</td><td><math>4,71 \cdot 10^{-19}</math></td></tr> <tr><td>9</td><td>611</td><td><math>3,21 \cdot 10^{-19}</math></td></tr> <tr><td>10</td><td>292</td><td><math>6,72 \cdot 10^{-19}</math></td></tr> <tr><td>11</td><td>320</td><td><math>6,13 \cdot 10^{-19}</math></td></tr> <tr><td>12</td><td>1027</td><td><math>1,91 \cdot 10^{-19}</math></td></tr> <tr><td>13</td><td>394</td><td><math>4,98 \cdot 10^{-19}</math></td></tr> <tr><td>14</td><td>1317</td><td><math>1,49 \cdot 10^{-19}</math></td></tr> <tr><td>15</td><td>584</td><td><math>3,36 \cdot 10^{-19}</math></td></tr> </tbody> </table>	Versuchs - nummer	Spannung $U$ in V	Ladung $Q$ in C	1	1141	$1,72 \cdot 10^{-19}$	2	394	$4,98 \cdot 10^{-19}$	3	312	$6,29 \cdot 10^{-19}$	4	421	$4,66 \cdot 10^{-19}$	5	1290	$1,52 \cdot 10^{-19}$	6	631	$3,11 \cdot 10^{-19}$	7	595	$3,30 \cdot 10^{-19}$	8	417	$4,71 \cdot 10^{-19}$	9	611	$3,21 \cdot 10^{-19}$	10	292	$6,72 \cdot 10^{-19}$	11	320	$6,13 \cdot 10^{-19}$	12	1027	$1,91 \cdot 10^{-19}$	13	394	$4,98 \cdot 10^{-19}$	14	1317	$1,49 \cdot 10^{-19}$	15	584	$3,36 \cdot 10^{-19}$	3
Versuchs - nummer	Spannung $U$ in V	Ladung $Q$ in C																																																
1	1141	$1,72 \cdot 10^{-19}$																																																
2	394	$4,98 \cdot 10^{-19}$																																																
3	312	$6,29 \cdot 10^{-19}$																																																
4	421	$4,66 \cdot 10^{-19}$																																																
5	1290	$1,52 \cdot 10^{-19}$																																																
6	631	$3,11 \cdot 10^{-19}$																																																
7	595	$3,30 \cdot 10^{-19}$																																																
8	417	$4,71 \cdot 10^{-19}$																																																
9	611	$3,21 \cdot 10^{-19}$																																																
10	292	$6,72 \cdot 10^{-19}$																																																
11	320	$6,13 \cdot 10^{-19}$																																																
12	1027	$1,91 \cdot 10^{-19}$																																																
13	394	$4,98 \cdot 10^{-19}$																																																
14	1317	$1,49 \cdot 10^{-19}$																																																
15	584	$3,36 \cdot 10^{-19}$																																																

Leistungskurs Physik  
Thema: Ladungen und Felder

	<p>Grafische Darstellung: <math>Q</math> gegen Versuchsnummer <math>n</math> aufgetragen</p>  <p>Deutung: Die Ladung tritt nur in Vielfachen der Elementarladung <math>e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}</math> auf.</p> <p>Zur Deutung eines Wissenschaftlers: Diese Deutung steht im Einklang mit den experimentellen Ergebnissen. Solange allerdings kein Grund vorliegt für die Annahme, dass Kautschukkügelchen immer <i>geradzahlige</i> Vielfache der Elementarladung tragen, ist die übliche Interpretation <i>ganzzahliger</i> Vielfacher jedoch einer doppelt so großen Elementarladung vorzuziehen.</p> <p>Grundsätzlich versucht man in der Physik, mit möglichst wenigen Zusatzannahmen auszukommen und bevorzugt die einfachste Deutung.</p>	2	
<p><b>c)</b> Erläuterung der Vorgehensweise bei verschiedenen großen Tröpfchen</p> <p>Der Tropfen sinkt mit konstanter Geschwindigkeit, weil die Schwerkraft <math>F_g</math> durch die Reibungskraft <math>F_r</math> kompensiert wird.</p> <p>Nachdem die Spannung gemessen wurde, die ein bestimmtes Tröpfchen im Schwebezustand hält, wird die Spannung ausgeschaltet und dessen Sinkgeschwindigkeit gemessen.</p> <p>Formelherleitung</p> <p>Aus <math>F_r = F_g</math> folgt <math>6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r \cdot v = m \cdot g</math> und mit</p> $m = \rho \cdot V = \rho \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3$ <p>ergibt sich nach Einsetzen und Auflösen</p> $r = \sqrt{\frac{9 \cdot \eta \cdot v}{2 \cdot \rho \cdot g}} \quad \text{und} \quad m = \rho \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \left( \sqrt{\frac{9 \cdot \eta \cdot v}{2 \cdot \rho \cdot g}} \right)^3$		4	6

Leistungskurs Physik  
Thema: Ladungen und Felder

<b>d)</b>	<p>Offene Fragestellung; auch andere als die angegebenen Antworten können akzeptiert werden, wenn sie physikalisch sinnvoll sind.</p> <p>Skizze (Wasserstoffvorrat, Ionisierung, Beschleunigung im elektrischen Feld, Ablenkung im magnetischen Feld / Geschwindigkeitsfilter)</p> <p>Beschreibung des Messverfahrens, Diskussion möglicher Probleme Die Methode setzt voraus, dass Wasserstoffionen annähernd die gleiche Masse wie Wasserstoffatome haben. Der Wasserstoff muss z.B. durch ionisierende Strahlung oder durch Erhitzen ionisiert werden. Die beschleunigten Ionen sollten zur Bestimmung der Geschwindigkeit ein Geschwindigkeitsfilter durchlaufen. Da die Masse der Ionen viel größer ist als die Elektronenmasse, ist ein sehr großer Krümmungsradius zu erwarten – die Anordnung muss genügend groß sein.</p>	3	
	Summe	40	

**Aufgabe 3) zum Thema Quantenphysik**

**Hinweise für die Kurslehrkraft**

**Die Lehrkraft wählt zwei der Aufgaben 1) bis 4) aus. Die Schülerinnen und Schüler bearbeiten beide Aufgaben.**

**Aufgabe 3) darf mit Aufgabe 1) oder Aufgabe 2) kombiniert, aber nicht mit Aufgabe 4) zusammen verwendet werden.**

**Die nachfolgende Aufgabe ist nicht mit der Durchführung eines Experimentes verbunden. Den Schülerinnen und Schülern dürfen nur die Schülerversion der Aufgabe sowie die angegebenen Hilfsmittel ausgehändigt werden.**



### Aufgabe 3) Doppelspalt-Experiment

Elektronen der kinetischen Energie 600 eV treffen orthogonal auf einen Doppelspalt mit dem Spaltabstand 200 nm. Im Abstand 20,0 cm hinter dem Doppelspalt befindet sich eine fotografische Platte. Die ganze Anordnung befindet sich im Vakuum.

Die praktische Durchführung dieses Versuchs zum Nachweis von Elektronen-Interferenzen am Doppelspalt gelang erstmals 1961 C. Jönsson in Tübingen.

Das nebenstehende Bild zeigt einen stark nachvergrößerten Ausschnitt der Platte von Jönsson als Positiv, d.h. diejenigen Stellen, an denen Elektronen auftreffen, erscheinen hell.



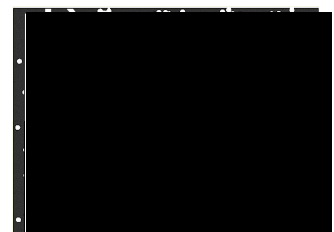
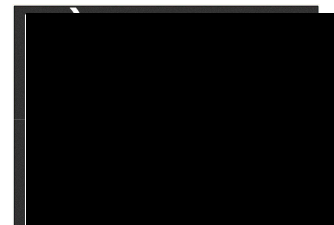
- a) Geben Sie eine kurze qualitative Erklärung für die Struktur des Bildes. Vergleichen Sie diese Erklärung mit einer Betrachtung aus der Sicht der klassischen Physik. Berechnen Sie aus den obigen Daten den Mittenabstand zweier benachbarter gleichartiger Streifen auf der Platte. Leiten Sie anhand einer Skizze die dafür benötigte Formel her.

(15 Rohpunkte)

- b) Im Jahr 1989 wurde ein Doppelspalt-Experiment mit einzelnen Elektronen durchgeführt, d.h. es befand sich jeweils nur ein Elektron in der Versuchsanordnung. Dabei ergaben sich Bilder, wie in den beiden Abbildungen rechts dargestellt.

Im Bild a) trafen weniger als 20 Elektronen die Fotoplatte.

Im Bild b) trafen mehr als 1000 Elektronen die Fotoplatte.



Erläutern Sie die Abbildungen a) und b) mit Mitteln der Quantenphysik.

Von dem Physiker Paul Dirac stammt sinngemäß die Aussage: "Jedes Quantenobjekt interferiert mit sich selbst." Nehmen Sie im Hinblick auf das Ergebnis des beschriebenen Experiments hierzu Stellung.

Erläutern Sie, wie sich eine Ortsmessung der Elektronen in der Doppelspaltebene auf das Interferenzbild auswirkt.

(12 Rohpunkte)

weiter auf der nächsten Seite

Leistungskurs Physik  
Thema: Quantenphysik

---

- c) Für Elektronen gilt die so genannte Unschärferelation z. B. in der Form  $\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \frac{h}{2}$ . Mit Hilfe der Beugung am Spalt lässt sich dieses plausibel machen.

Skizzieren Sie das zugehörige Gedankenexperiment und erläutern Sie es.

(7 Rohpunkte)

- d) Für das Gelingen des eingangs beschriebenen Versuchs von Jönsson ist wichtig, dass die Elektronen möglichst einheitliche Energie besitzen.

Nehmen Sie zu dieser Aussage Stellung. Erläutern Sie die sich ergebenden Veränderungen, wenn die Elektronen unterschiedliche Energien besitzen.

(6 Rohpunkte)

**Hilfsmittel:**

Formelsammlung,  
nichtprogrammierbarer Taschenrechner,  
deutsches Wörterbuch

**Aufgabe 3) Doppelspalt-Experiment**

**Erwartete Schülerleistungen und Bewertungskriterien**

Teilaufgabe	Erwartete Leistung	Punkte	
		maximal	erreicht
a)	Kurze qualitative Erklärung für die Struktur des Bildes: Das Schirmbild entsteht durch Interferenz zweier Wellensysteme mit Zentren in den Spaltöffnungen.	2	
	Klassisch werden zwei Streifen erwartet. Jedes Elektron, das auf den Schirm gelangt, sollte durch einen der beiden Spalte fliegen und unbeeinflusst davon bleiben, ob der andere Spalt geöffnet oder geschlossen ist.	3	
	Wenn Elektronen klassische Teilchen wären, bliebe unverstündlich, warum mehr als zwei Streifen entstehen.		
	kommentierte Zeichnung	2	
	Herleitung der Formeln für den Doppelspalt: $\sin \alpha = \frac{\Delta s}{d}$ und $\tan \alpha = \frac{b_n}{a}$	3	
	Konstruktive Interferenz: $\Delta s = n \cdot \lambda$ Formeln zur Berechnung der Wellenlänge herleiten	2	
$e \cdot U = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 = \frac{p^2}{2 \cdot m} \Rightarrow$ $p = \sqrt{2 \cdot m \cdot e \cdot U} = 1,32 \cdot 10^{-23} \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}}$ $\lambda = \frac{h}{p} = 5,01 \cdot 10^{-11} \text{ m};$ Berechnung von $b$ : $b = 5,01 \cdot 10^{-5} \text{ m}$	3		

Leistungskurs Physik  
Thema: Quantenphysik

<b>b)</b>	Interpretation des Bildes a) Die Treffer verteilen sich scheinbar wahllos auf dem Schirm, d.h. es ist keine Aussage zu Einzelereignissen möglich sondern nur statistische Aussage zur Wahrscheinlichkeitsverteilung (Wahrscheinlichkeitsprinzip).	3	
	Mit der Zeit entsteht die Intensitätsverteilung des Doppelspalts. Dieses Bild ist bei jeder Durchführung gleich.	3	
	Auch wenn sich jeweils nur ein Objekt in der Anordnung befindet, trägt jedes Quant zur Intensitätsverteilung bei (Dirac). Es kann also objektiv nicht sein, dass das Quant auf einer Bahn durch einen der beiden Spalte gelangt ist.	3	
	Durch die Messung verschwindet die Intensitätsverteilung. Es ergibt sich stattdessen eine Verteilung, die die Summe der Einzelverteilungen darstellt.	3	
<b>c)</b>	Beschreiben des Experimentes (Beugung am Spalt) mit Skizze	3	
	Das Entstehen der Beugungsfigur deutet auf eine Änderung des Impulses quer zur Ausbreitungsrichtung hin. Interpretation der Spaltbreite als Ortsunschärfe $\Delta x$ . Die Unschärfe des Impulses quer zur Ausbreitungsrichtung wird durch jenen Querimpuls $\Delta p_x$ abgeschätzt, den ein Elektron hat, das im 1. Interferenzminimum nachgewiesen würde. Eine Verkleinerung der Spaltbreite erzeugt eine Vergrößerung der Impulsunschärfe. Hinweis: Eine Formelherleitung wird nicht ausdrücklich erwartet.	4	
<b>d)</b>	Einheitliche Energie bedeutet einheitlichen Impuls und damit einheitliche Wellenlängen	2	
	Unterschiedliche Energien ergeben unterschiedliche Wellenlängen, engere und weitere Streifensysteme überlagern sich, d.h. ein scharfes Streifensystem ist nicht mehr erkennbar.	4	
	Summe	40	

**Aufgabe 4) zum Thema Quantenphysik**

**Hinweise für die Kurslehrkraft**

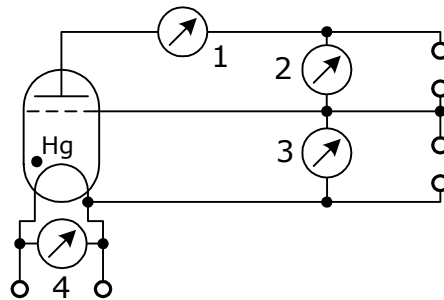
**Die Lehrkraft wählt zwei der Aufgaben 1) bis 4) aus. Die Schülerinnen und Schüler bearbeiten beide Aufgaben.**

**Aufgabe 4) darf mit Aufgabe 1) oder Aufgabe 2) kombiniert, aber nicht mit Aufgabe 3) zusammen verwendet werden.**

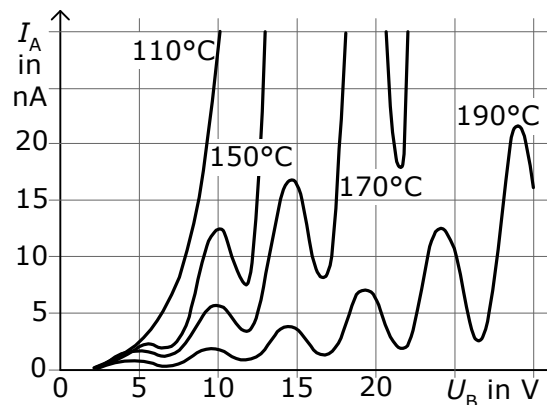
**Die nachfolgende Aufgabe ist nicht mit der Durchführung eines Experimentes verbunden. Den Schülerinnen und Schülern dürfen nur die Schülerversion der Aufgabe sowie die angegebenen Hilfsmittel ausgehändigt werden.**

#### Aufgabe 4) Franck-Hertz-Versuch

Der Franck-Hertz-Versuch wird gemäß dem unten dargestellten Schaltbild in einer mit Quecksilberdampf gefüllten Röhre durchgeführt.



Mit steigender Temperatur werden die folgenden Graphen registriert.



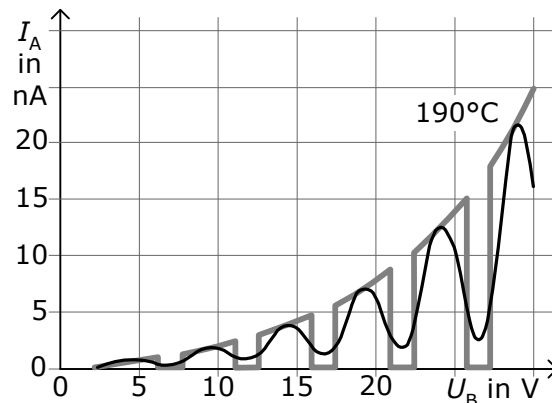
- a) Geben Sie die Funktion der Messgeräte und die Polung der Spannungen an. Beschreiben Sie die Bewegung der Elektronen in der Franck-Hertz-Röhre. Erläutern Sie unter Zuhilfenahme des Diagramms die Wechselwirkung der Elektronen mit den Hg-Dampf-Atomen in Abhängigkeit von der Energie der Elektronen und der temperaturabhängigen Dichte des Hg-Dampfes.

(14 Rohpunkte)

Weiter auf der nächsten Seite

Leistungskurs Physik  
Thema: Quantenphysik

- b) Erläutern Sie die Energieaufnahme der Hg-Atome und in diesem Zusammenhang die Bedeutung des Versuchs für die Entwicklung von Atommodellen. Bestimmen Sie die absorbierte Energie aus der 190°C-Kurve. Zeigen Sie durch eine Rechnung, dass die Hg-Atome Strahlung im UV-Bereich aussenden können. Erklären Sie, weshalb dennoch auch sichtbares Licht entstehen kann.



Zusätzlich zur 190°C-Kurve aus Aufgabenteil a) ist hier ein idealisierter Verlauf der Auffangstromstärke in die Graphik aufgenommen worden. Diskutieren Sie den idealisierten Kurvenverlauf im Vergleich zu dem gemessenen.

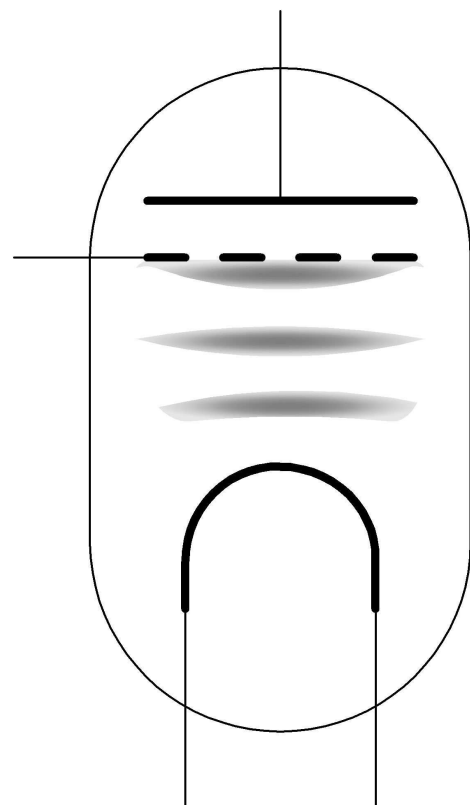
(18 Rohpunkte)

- c) Mit einer UV-empfindlichen Kamera wird die mit Quecksilberdampf gefüllte Franck-Hertz-Röhre im Betrieb aufgenommen. Die Zeichnung stellt Bereiche in der Röhre dar, die UV-Strahlung emittieren.

Ab einer Beschleunigungsspannung von ca. 7 V registriert die Kamera nahe dem im Bild oben angeordneten Gitter UV-Strahlung. Mit höherer Spannung verlagert sich der strahlende Bereich in Richtung Kathode. Ab ca. 12 V entsteht am Gitter ein zweiter strahlender Bereich, der bei weiterer Erhöhung der Spannung ebenfalls in Richtung Kathode wandert. Bei ca. 17 V ergibt sich eine Schichtung wie im Bild dargestellt.

Erläutern Sie die Schichtung der Bereiche, die UV-Strahlung emittieren.

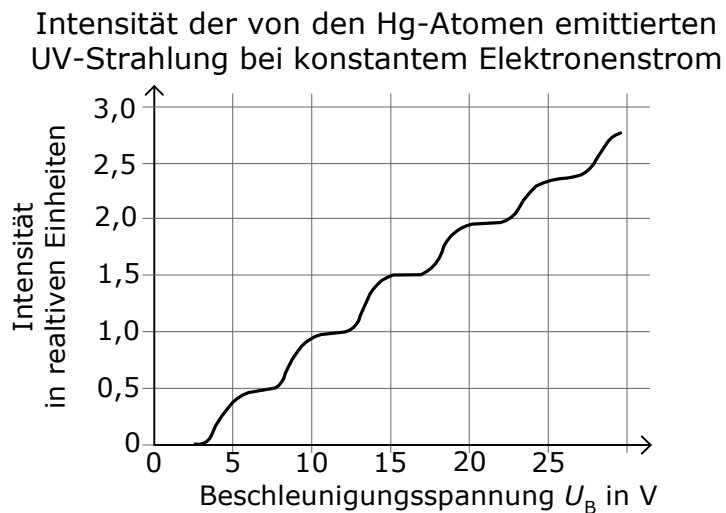
(4 Rohpunkte)



Weiter auf der nächsten Seite

Leistungskurs Physik  
Thema: Quantenphysik

- d) Der Franck-Hertz-Versuch wird nun durch eine elektronische Schaltung so verändert, dass der Emissionsstrom der Kathode konstant gehalten wird. Er ist damit unabhängig von der Beschleunigungsspannung. Gemessen wird die Intensität der UV-Strahlung, welche die Hg-Atome emittieren.



Erklären Sie den Verlauf der Intensitätskurve. Begründen Sie die Notwendigkeit der oben beschriebenen Regelung.

(4 Rohpunkte)

**Hilfsmittel:**

Formelsammlung,  
nichtprogrammierbarer Taschenrechner,  
deutsches Wörterbuch



**Aufgabe 4) Franck-Hertz-Versuch**

**Erwartete Schülerleistungen und Bewertungskriterien**

Teilaufgabe	Erwartete Leistung	Punkte	
		maximal	erreicht
a)	Funktion der Messgeräte und Polung angeben	3	
	Beschreibung der Durchführung: Ausdampfen der Elektronen, Beschleunigung im elektrischen Feld, Energieaufnahme der Elektronen, Stoßprozesse in Abhängigkeit von der aufgenommenen Energie, Abbremsung im Gegenfeld und Erreichen der Auffangelektrode je nach restlicher kinetischer Energie. Je nach Energie sind mehrfache Anregungen in verschiedenen Bereichen der Röhre durch dasselbe Elektron möglich. Die Messung der Stromstärke lässt dann Rückschlüsse auf die bei den Stößen übertragene Energie zu.	7	
	Einfluss der Dichte des Hg-Gases: Je heißer der Ofen, desto dichter das Gas und desto geringer die freie Weglänge der Elektronen. Weniger Elektronen erreichen die Auffangelektrode mit der Folge geringerer Stromstärke.	4	
b)	Der Versuch belegt, dass Atome Energie nur gequantelt aufnehmen können. Hier absorbieren Hg-Atome nur Energiebeträge von etwa 5 eV, durch die sie in einen angeregten Zustand versetzt werden. Die Ablesung erfolgt durch Messung der Abstände der Minima in der Graphik.	6	
	Daraus ergibt sich eine Wellenlänge von ca. 250 nm. Sichtbares Licht entsteht durch Einnehmen eines metastabilen Zustandes und anschließende Rückkehr in einen stabilen Zustand. Anmerkung: Auch eine Erklärung durch Anregung des höher-energetischen Zustandes und Übergang auf den ersten angeregten Zustand unter Emission sichtbaren Lichts ist zu akzeptieren.	4	
	Anstieg durch die Maxima: Verhalten von Elektronen in einer Röhre ohne Wechselwirkung mit Hg	8	
	Senkrechter Abfall/Anstieg: alle Elektronen haben auf der gleichen Äquipotenzialfläche die gleiche kinetische Energie und wechselwirken an dieser Stelle alle mit den Hg-Atomen Endliche Breite der Minima: Betrag der Gegenspannung Rückgang der Stromstärke auf null: s. o.		

Leistungskurs Physik  
Thema: Quantenphysik

<b>c)</b>	Die Schichten entstehen durch Energieansammlung im elektrischen Feld, wenn sich die Elektronen parallel zu den Feldlinien bewegen und eine bestimmte Potenzialdifferenz durchlaufen haben. Sobald die aufgenommene Energie ausreicht, kann ein Stoßprozess mit anschließender Emission eines Photons stattfinden. Da die Äquipotenzialflächen senkrecht zu den Feldlinien verlaufen, entsteht die beobachtbare Schichtung.	4	
<b>d)</b>	Jede neue UV-Strahlung emittierende Schicht bewirkt ein stufenweises Ansteigen der Strahlungsintensität. Durch die Konstanz der Stromstärke wird bewirkt, dass die Anzahl der angeregten Hg-Atome innerhalb einer Schicht konstant ist. Die Gesamtzahl erhöht sich nur durch das Entstehen einer weiteren leuchtenden Schicht.	4	
		Summe	40