Hessisches Kultusministerium

Landesabitur 2007
Beispielaufgaben

Physik

Leistungskurs

Aufgabenset 1

Auswahlverfahren: **Es gibt drei Aufgabengruppen A, B und C. In jeder Gruppe stehen zwei Aufgaben zur Auswahl, von denen jeweils eine zu bearbeiten ist.**

Einlese- und Auswahlzeit: **30 Minuten**

Bearbeitungszeit: **240 Minuten**

Erlaubte Hilfsmittel:	**eingeführter Taschenrechner (bei graphikfähigen Rechnern und Computeralgebrasystemen ist ein Reset durchzuführen) Formelsammlungen, die alle üblichen Formeln aber keine Herleitungen oder weitergehende physikalische Erklärungen enthalten Wörterbuch der deutschen Rechtschreibung**
Sonstige Hinweise:	**siehe Seite 2**

I. Thema und Aufgabenstellung

A Elektrische und magnetische Felder

B Mechanische und elektromagnetische Schwingungen und Wellen

C Quanten- und Atomphysik

BESONDERE BEMERKUNGEN:

Es gibt drei Aufgabengruppen A, B und C. In jeder Gruppe stehen zwei Aufgaben zur Auswahl, von denen jeweils eine zu bearbeiten ist. Alle Aufgaben erbringen die gleiche Anzahl an Bewertungseinheiten

Markieren Sie die von Ihnen gewählten Aufgaben durch Ankreuzen der dafür vorgesehenen Felder in der angefügten Tabelle.

Verwenden Sie für jede Aufgabe ein gesondertes Blatt.

Kombinierte Formelsammlungen für Mathematik und Naturwissenschaften sind erlaubt.

Folgende Aufgaben sollen gewertet werden: (nur ein Kreuz pro Zeile)

A1		**A2**	
B1		**B2**	
C1		**C2**	

A1: Elektrische und magnetische Felder

Die nebenstehende Abbildung zeigt einen Versuchsaufbau, bei dem der Raum unterhalb der horizontal liegenden Ebene E von einem homogenen Magnetfeld der Stärke $B = 1{,}60$ T erfüllt ist. Unmittelbar über dieser Ebene befindet sich eine sehr lange, starre Leiterschleife der Breite $b = 0{,}400$ m. Die Leiterschleife habe die Gesamtmasse 200g. Die durch die Leiterschleife aufgespannte Ebene und die Richtung der Magnetfeldlinien verlaufen senkrecht zueinander.

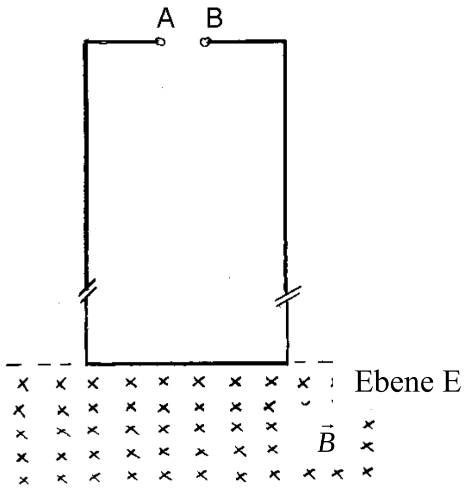

Abb. A1.1

a) Die Leiterschleife wird nun teilweise in das Magnetfeld eingetaucht, so dass die Anschlüsse A und B noch außerhalb des Magnetfeldes sind.
An den Anschlüssen A und B wird eine Stromquelle angeschlossen.
Bestimmen Sie Stromstärke und -richtung in der Leiterschleife, wenn auf die Aufhängung der Leiterschleife keine Kraft wirken soll? **(7 BE)**

b) Nun wird die Leiterschleife mit der konstanten Geschwindigkeit $v = 2{,}00\,\frac{cm}{s}$ in das Magnetfeld hineinbewegt. Welche Spannung wird zwischen den Anschlüssen A und B dabei induziert? **(7 BE)**

c) Leiten Sie allgemein die Spannung zwischen den Punkten A und B für beliebiges v und beliebiges B mithilfe der Lorentzkraft her. **(10 BE)**

d) Die Leiterschleife soll sich nun zunächst ruhend unmittelbar oberhalb der Ebene E befinden. Diesmal fällt sie in das Magnetfeld hinein (idealer freier Fall).
Bestimmen Sie den zeitlichen Verlauf der induzierten Spannung quantitativ. **(8 BE)**

e) Man führt den gleichen Versuch wie in Teilaufgabe c) durch, schließt jedoch vorher die Leiterschleife kurz. Die kurzgeschlossene Leiterschleife habe einen Gesamtwiderstand von $R = 5\ \Omega$.

Beschreiben und erklären Sie den zeitlichen Verlauf der Beschleunigung und der Geschwindigkeit der Leiterschleife qualitativ, solange diese sich noch nicht vollständig im Magnetfeld befindet.
Berechnen Sie die Grenzgeschwindigkeit v_0. **(8 BE)**

A2: Elektrisches und magnetisches Feld

Mit der in Abbildung 1 skizzierten Versuchsanordnung sollen die Geschwindigkeit v und die Masse m von Elektronen experimentell bestimmt werden.
Die in einer (hier nicht abgebildeten) „Elektronenkanone“ auf die Geschwindigkeit v beschleunigten Elektronen treten durch die Blende Bl_1 in ein homogenes Magnetfeld $\vec{B}$ ein. Nach Durchlaufen der Blenden Bl_2 und Bl_3 gelangen sie in einen Kondensator mit zylindrischen Begrenzungsplatten, in dem die elektrische Feldstärke $\vec{E}$ so eingestellt wird, dass sich die Elektronen auf einem zweiten Kreisbogen vom Radius R bewegen. Die bei der Blende Bl_4 austretenden Elektronen werden mit einem Zählrohr ZR registriert.

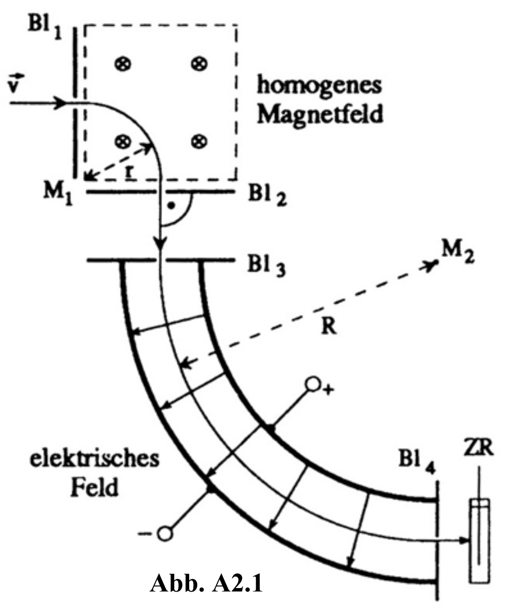

Abb. A2.1

a. Erläutern Sie den prinzipiellen Aufbau und die Funktionsweise einer „Elektronenkanone“, die freie Elektronen mit der Geschwindigkeit v erzeugt.
Leiten Sie eine Gleichung zur Berechnung der Geschwindigkeit v (nichtrelativistisch) her, mit der die Elektronen diese Beschleunigungseinheit verlassen. **(10 BE)**

b. Begründen Sie, welche Form die Bahnkurve der Elektronen im Magnetfeld B hat und erklären Sie, warum Elektronen die gesamte Anordnung mit konstantem Geschwindigkeitsbetrag durchlaufen. **(4 BE)**

c. Leiten Sie allgemein einen Term für den Geschwindigkeitsbetrag v und die Masse m der Elektronen, die im Zählrohr registriert werden, in Abhängigkeit von den Größen r, R, B und E her. $\left[Zwischenergebnis: v = \frac{E \cdot R}{r \cdot B} \right]$ **(9 BE)**

d. Für die geometrischen Daten der Anordnung gilt $r = 0{,}5$ m; $R = 2{,}0$ m. Da die zylindrischen Platten des Kondensators nur einen Abstand $d = 2$ cm haben, kann man das elektrische Feld als homogen ansehen. An den beiden Platten liegt die Spannung U_A an. In einer Versuchreihe werden Elektronen auf verschiedene Geschwindigkeiten beschleunigt und es wird die Spannung U_A sowie die magnetische Flussdichte B gemessen, wenn die Elektronen im Zählrohr registriert werden. Dabei ergaben sich für eine Messung folgende Werte: $U_A = 10{,}68$ kV und $B = 7{,}76$ mT.
Berechnen Sie den Geschwindigkeitsbetrag v und die Masse m der Elektronen. **(5 BE)**

„Das wichtigste Ergebnis der speziellen Relativitätstheorie betraf die träge Masse körperlicher Systeme. Es ergab sich, dass die Trägheit eines Systems von seinem Energieinhalt abhängen müsse und man gelangte geradezu zur Auffassung, dass träge Masse nichts anderes sei als latente Energie.“[1]

[1] A.Einstein, Mein Weltbild, Berlin 1956, p.129

Die träge Masse eines Körpers hängt von seiner Geschwindigkeit ab und man spricht in diesem Zusammenhang von der Ruhemasse m_0, wenn der Körper im Bezugssystem die Geschwindigkeit null hat. Hat der Körper im Bezugssystem die Geschwindigkeit v, so ergibt sich folgender Zusammenhang zwischen Ruhemasse m_0 und tatsächlicher Masse m : $m = \frac{m_0}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$.

e. Zeigen Sie, dass die oben genannten Messergebnisse diesen relativistischen Zusammenhang zwischen m und v bestätigen
[Zwischenergebnisse: $m = 2{,}26 \cdot 10^{-30}$ kg; $v = 2{,}75 \cdot 10^{8}$ m/s] **(3 BE)**

f. Die oben angesprochene Äquivalenz von Masse und Energie liefert die folgende Formel zur relativistischen Berechnung der kinetischen Energie $E_{kin} = (m-m_0) \cdot c^2$.
Berechnen Sie für die Messwerte der ersten Messung die kinetische Energie der Elektronen. Welche Spannung müssen die Elektronen in der „Elektronenkanone“ durchlaufen haben? **(4 BE)**

g. Mit demselben Versuch sollen Protonen untersucht werden. Der geometrische Aufbau wird nicht verändert.
Begründen Sie, wie man die Spannungen und Feldstärken im Verhältnis zum Elektron verändern muss, wenn das Proton mit der gleichen Geschwindigkeit die Apparatur durchfliegen soll? **(5 BE)**

B1: Mechanische und elektromagnetische Schwingungen und Wellen

Ein beiderseits offenes U-förmiges Glasrohr (Abb. B1.1) ist mit Wasser gefüllt. Die Wassersäule (Gesamtlänge l) in dem Rohr kann Schwingungen um ihre Gleichgewichtslage durchführen. Zu Beginn der Schwingung steht die Wassersäule in einem Schenkel mit der Anfangsamplitude s_o über der Gleichgewichtslage.

a. Weisen Sie nach, dass die Schwingung harmonisch ist, solange noch Wasser in beiden Schenkeln ist. Dabei soll zuerst die Reibung innerhalb der Flüssigkeit und an den Wänden vernachlässigt werden. Zeigen Sie, dass der Term

$2\rho_{H_2O} \cdot A \cdot g$

[ρ_{H_2O}: *Dichte des Wassers; A: Querschnittsfläche*]

der Proportionalitätsfaktor aus rücktreibender Kraft und Elongation ist. **(6 BE)**

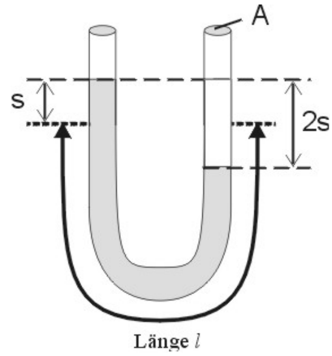

Abb. B1.1 U-Rohr

b. Stellen Sie die Schwingungsdifferentialgleichung der ungedämpften Schwingung auf. Bestimmen Sie mit einem allgemeinen Lösungsansatz das Weg-Zeit-Gesetz dieser ungedämpften Schwingung mit dem Anfangswert $s(0) = s_0$.

Leiten Sie für die Schwingungsdauer T den Term $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{2g}}$ her. **(12 BE)**

c. In der Abbildung B1.3 ist das $s(t)$-Diagramm der gedämpften U-Rohr-Schwingung für die Gesamtlänge $l = 2$ m aufgezeichnet.
Bestimmen Sie den im Experiment ermittelten Wert für die Schwingungsdauer.
Weisen Sie nach, dass eine exponentielle Abnahme der Amplitude vorliegt und ermitteln Sie die mittlere Dämpfungskonstante k für den Dämpfungsfaktor e^{-kt} anhand von mindestens 4 Messwerten und stellen Sie das $s(t)$-Gesetz dieser Schwingung auf.
Berechnen Sie den theoretischen Wert für die Schwingungsdauer und vergleichen Sie jetzt den theoretischen Wert der ungedämpften Schwingungsdauer mit dem experimentell ermittelten. Was folgern Sie daraus? **(18 BE)**

d. Der linke zylindrische Teil des U-Rohres wird jetzt durch einen Trichter ersetzt (Abb.B1.2). Untersuchen Sie, ob die ungedämpfte Schwingung harmonisch bleibt? **(4 BE)**

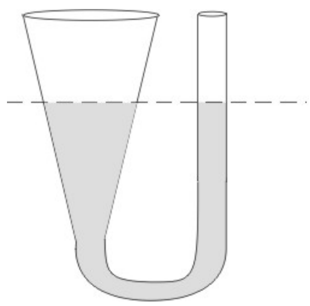

Abb. B1.2

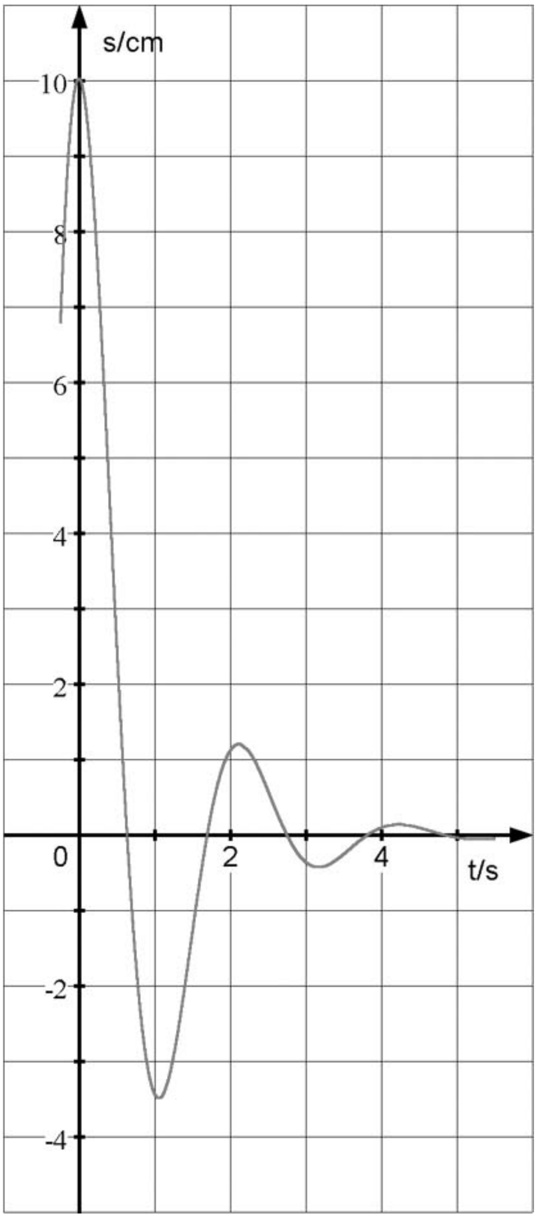

Abb.B1.3 s(t)-Diagramm der gedämpften U-Rohr Schwingung

B2 Mechanische und elektromagnetische Schwingungen und Wellen

Zur Verfügung stehen 1 Sinusgenerator zur Erzeugung von Schwingungen, 2 Lautsprecher (L_1 und L_2), 2 Mikrofone (M_1 und M_2) und ein Zwei-Kanal-Oszilloskop.

a. Ein Lautsprecher und ein Mikrofon werden, wie in Abbildung B2.1 dargestellt, aufgebaut und der Mikrofonausgang mit dem y-Eingang des Oszilloskops verbunden.
Die Zeitablenkung (x-Ablenkung) ist intern auf 0,3 ms/cm eingestellt und auf dem Oszilloskop erscheint ein Kurvenverlauf wie in Abbildung B2.2 dargestellt.
Welche Frequenz hat der vom Lautsprecher abgestrahlte Ton? **(4 BE)**

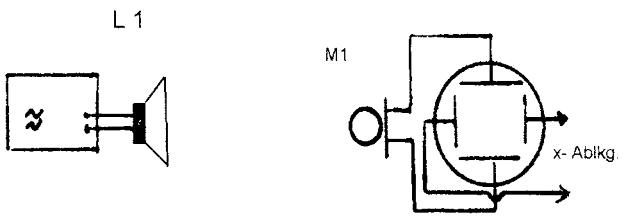

Abb. B2.1

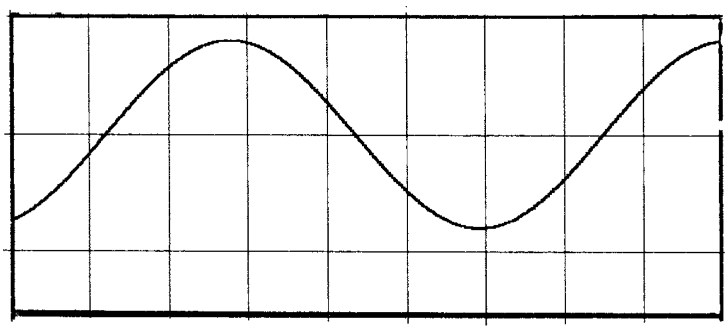

Abb. B2.2

b. Ein Lautsprecher und zwei Mikrofone werden nun wie in Abbildung B2.3 aufgebaut. Eine gegenseitige Beeinflussung der beiden Mikrofone findet nicht statt. Stehen M_1 und M_2 dicht beieinander, liegen die am Oszilloskop dargestellten Kurven fast aufeinander. Bewegt man nun M_2 langsam von M_1 und dem Lautsprecher weg, so erhält man erstmals für den Abstand
d= $\overline{M_1M_2}$ = 8,5 cm das in Abbildung B2.4 dargestellte Bild.
Wie groß ist die Schallgeschwindigkeit in Luft, wenn die Frequenz des Tones 1970 Hz beträgt? **(6 BE)**

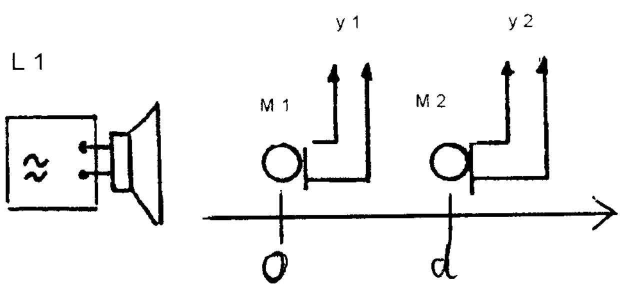

Abbildung B2.3

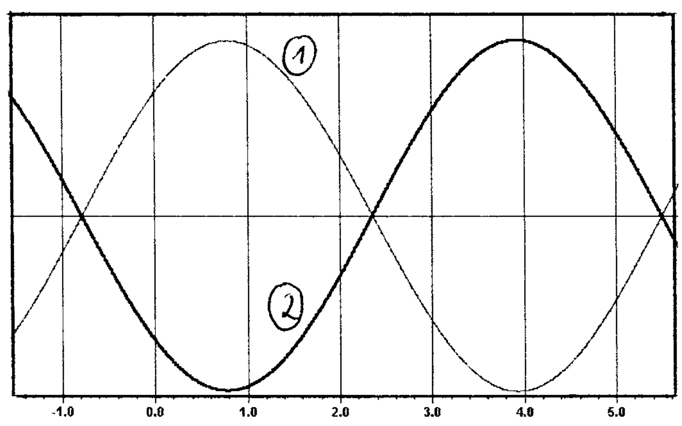

Abbildung B2.4

c. Die Frequenz unter Versuchsbedingung b. wird nun verdoppelt. Der Abstand $d = \overline{M_1 M_2}$ bleibt bei 8,5cm. Beschreiben Sie, wie das Schirmbild auf dem Oszilloskop im Vergleich zu dem Ergebnis unter b. aussieht. **(6 BE)**

d. Das Mikrofon wird nun wie in Abbildung B2.5 auf einem Wagen befestigt und in die Mitte zwischen beiden Lautsprechern platziert. In dieser Mittenstellung des Mikrofons registriert man ein Maximum der Lautstärke.
Bei einer Verschiebung des Wagens längs der Verbindungsgeraden L_1L_2 werden abwechselnd Maxima und Minima beobachtet. Begründen Sie die Beobachtung.
Bei einer Verschiebung von M wird an der Stelle s = 24 cm ein Maximum registriert. Zwischen der Mittenstellung und dieser Stelle registriert man 12 Minima.
Bestimmen Sie die Frequenz f_0 eingestellten Tones. **(8 BE)**

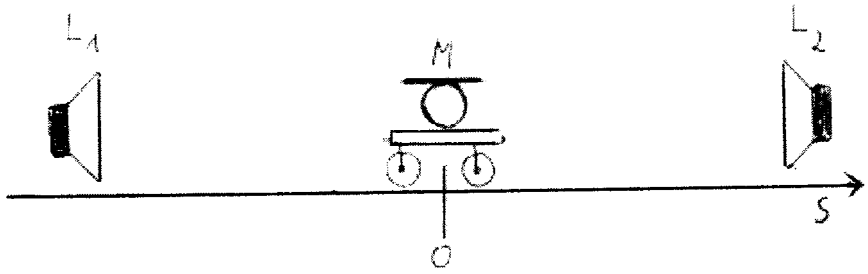

Abbildung B2.5

d. L_2 wird nun entfernt. Mikrofon und Wagen werden, wie in der Abbildung B2.6 dargestellt, an ein Federsystem angekoppelt, das harmonische Schwingungen in der Horizontalen ausführen kann. Der Lautsprecher L_1 strahlt einen Ton der Frequenz f_3 = 8500 Hz ab. Das System aus Wagen, Federn und Mikrofon mit einer Gesamtmasse m= 1,2 kg und der wirksamen Federkonstanten $D = 11{,}8\ \frac{N}{m}$ wird nach links um s = - 0,32 m ausgelenkt und zum Zeitpunkt t = 0 s losgelassen. Das System schwingt mit der Periodendauer T. Ermitteln Sie die vom Mikrofon zu den Zeitpunkten t = 0 sec, $t = \frac{1}{4}T$, $t = \frac{1}{2}T$ und $t = \frac{3}{4}T$ registrierten Frequenzen. **(6 BE)**

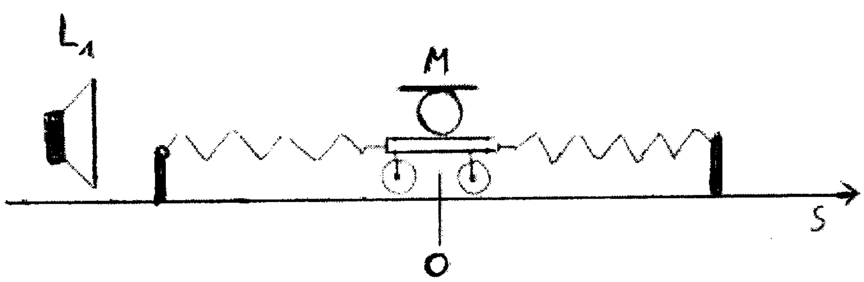

Abbildung B2.6

C1: Quanten- und Atomphysik

Die Erklärung des äußeren Photoeffekts durch Albert Einstein im Jahre 1905 steht am Anfang der Quantenphysik.

a. Beschreiben Sie ein Experiment, mit dem man diesen Effekt untersuchen kann. Geben Sie an, wie dabei die kinetische Energie der ausgelösten Elektronen bestimmt wird. **(4 BE)**

b. Nennen Sie mindestens zwei experimentelle Ergebnisse, die sich bei diesem Experiment im Rahmen der Wellentheorie des Lichtes nicht erklären lassen. Wie löste Einstein diesen Widerspruch zur klassischen Physik? **(4 BE)**

c. Eine Photozelle wird nacheinander mit monochromatischem Licht verschiedener Frequenzen f_i beleuchtet. Dabei werden die folgenden Gegenspannungen bzw. Photospannungen U_i gemessen:

i	1	2	3	4
f_i / 10^{14} Hz	5,50	6,10	6,88	7,40
U_i / V	0,07	0,32	0,64	0,86

Bestimmen Sie aus diesen Messwerten die Grenzfrequenz f_0 und die Austrittsenergie E_A bzw. Ablösearbeit W_A des bei der Photozelle verwendeten Materials sowie den Wert der Planck'schen Konstanten h. **(15 BE)**

d. An die Photozelle wird eine Spannung angelegt, die genügend groß ist, so dass alle ausgelösten Elektronen als sogenannter Photostrom abgeleitet werden.

Wie ändert sich der Photostrom und wie ändert sich die Energie der ausgelösten Elektronen, wenn die Intensität der einfallenden monochromatischen Strahlung verdoppelt wird? (Begründen Sie ohne Rechnung.)

Wie ändert sich der Photostrom und wie ändert sich die Energie der ausgelösten Elektronen, wenn nun die einfallende Strahlung durch eine monochromatische Strahlung mit kürzerer Wellenlänge ersetzt wird und dabei die Intensität gleich bleibt? (Begründen Sie ohne Rechnung.) **(6 BE)**

e. Das wirksame Material der Photozelle hat eine Fläche von 0,500 cm². Von den darauf auftreffenden Photonen wird ein großer Teil reflektiert, nur 12,5 % lösen Elektronen aus. Wie stark ist der Photostrom, wenn die Strahlung mit der Wellenläge λ = 545 nm eine Intensität von 32,0 mW / cm² besitzt? **(6 BE)**

f. Eine andere Photokathode ist mit einem unbekannten Material beschichtet. Sie wird zuerst mit Licht der Wellenlänge λ_1 = 440 nm, dann mit Licht der Wellenlänge

λ_4 = 680 nm bestrahlt. Das Verhältnis der zugehörigen Photospannungen beträgt $\frac{U_1}{U_2} = 3{,}2$. Berechnen Sie die Austrittsenergie E_A dieser Photokathode. **(5 BE)**

C2: Atom- und Quantenphysik

Das zunehmende Verständnis des Lichts war Grundlage des Übergangs von der klassischen Physik zur Quantenphysik.

a. In der klassischen Physik werden Beobachtungen im Zusammenhang mit dem Licht zum Teil mit der Wellenvorstellung zum Teil mit der Teilchenvorstellung beschrieben. Nennen Sie jeweils ein Phänomen, das nur mit dem Wellenmodell und ein solches, das nur mit dem Teilchenmodell des Lichts erklärt werden kann. **(6 BE)**

b. Einstein hat 1916 die Lichtquantenhypothese erweitert, indem er Lichtquanten als Teilchen ansah, die außer der Energie E auch einen Impuls p besitzen.
Leiten Sie die Formel zur Berechnung des Impulses p aus der Lichtquantenhypothese her. (Verwenden Sie dabei die Grundaussage der relativistischen Dynamik $E = mc^2$, nach der Masse m und Energie E äquivalent sind.)
Die Sonnenstrahlung hat ihr Intensitätsmaximum im grünen Bereich bei einer Wellenlänge von etwa $\lambda = 550$ nm. Berechnen Sie die Energie E und den Impuls p eines Photons dieser Wellenlänge. Geben Sie die Energie in der Einheit 1 eV, den Impuls in der Einheit 1 eV/c an. **(10 BE)**

c. Die Sonnenstrahlung hat am Ort der Erde die Intensität $S = P/A = 1{,}39\ \text{kW/m}^2$.
Berechnen Sie mit der Formel $S = \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}}\, E^2$
die elektrische Feldstärke E der zugehörigen elektromagnetischen Welle.
Im Teilchenbild kann die Intensität S der Strahlung mit Hilfe der Anzahl N der Photonen beschrieben werden, die mit einer bestimmten Rate $\Delta N/\Delta t$ auf eine Fläche A treffen. Von wie viel Photonen wird demnach die Erde (Radius $R = 6370$ km) in jeder Sekunde getroffen? (Nehmen Sie vereinfachend an, die gesamte Strahlung würde im grünen Bereich des Spektrums bei $\lambda = 550$ nm erfolgen.)
Wie vereint die Quantenphysik die unterschiedlichen Bilder, die den beiden Berechnungen zugrunde liegen? **(12 BE)**

d. Die Streuung des Lichts an der Oberfläche von Metallen kann man als Wechselwirkung von Photonen mit den Leitungselektronen verstehen, wobei die Elektronen als frei angesehen werden können.
Berechnen Sie die Masse m eines Photons der Wellenlänge $\lambda = 550$ nm und erklären Sie, warum das gestreute Licht die gleiche Farbe wie das einfallende Licht hat.
Was ist zu erwarten, wenn Röntgenstrahlung der Wellenlänge $\lambda = 8$ pm an den Leitungselektronen gestreut wird? **(6 BE)**

e. Bringen Sie die Überlegungen der Teilaufgabe **c** in Zusammenhang mit dem Compton-Effekt und erläutern Sie die Formel für die Verschiebung der Wellenlänge
$$\Delta\lambda = \frac{h}{m_e\, c}(1 - \cos\varphi)\,.$$
Berechnen Sie die kinetische Energie E_{kin}, die ein Elektron erhält, wenn es von einem Röntgenphoton dieser Wellenlänge so getroffen wird, dass das Photon um 90° aus seiner ursprünglichen Richtung gestreut wird. **(6 BE)**

Korrektur- und Bewertungshinweise
- nicht für den Prüfungsteilnehmer bestimmt -

II. Erläuterungen

Voraussetzungen gemäß Lehrplan:

III. Lösungshinweise

A1: Elektrische und magnetische Felder

Nr.	Lösung	BE Anf.bereich I	II	III
a	Die Gewichtskraft der Leiterschleife wird durch die Lorentzkraft aufgehoben. Um dies zu erreichen müssen beide Kräfte dem Betrage nach gleich groß sein: $F_L = F_G$ $I \cdot b \cdot B = m \cdot g$ $I = \frac{mg}{bB} = 3{,}066\text{A}$ Nach der Dreifingerregel muss hierbei der positive Pol der Stromquelle an A und der negative Pol an B angeschlossen werden. Dann sind die Kräfte entgegengesetzt.	4	3	
b	Zur Berechnung der induzierten Spannung ist das Induktionsgesetz anzuwenden. Rechnet man nur mit den Beträgen folgt: $\lvert U_{ind} \rvert = \dot{\Phi} = \frac{d(BA)}{dt} = B \cdot \dot{A} = Bb\dot{s} = Bbv = 1{,}28 \cdot 10^{-2}\,\text{V}$	3	4	
c	Es wird nur der waagrechte Leiterteil betrachtet, da sich die Kräfte auf die anderen im Magnetfeld befindlichen Leiterteile ausgleichen. Auf diesen Leiterteil wirkt die Lorentzkraft: $F_L = qvB$ Diese führt zum Aufbau der Spannung zwischen den Punkten A und B. Daher gilt: $qvB = qE = \frac{qU}{b} \Rightarrow U = bvB$	5	5	

d	Der Ansatz unter c) verläuft ähnlich dem unter b). Hier ist jedoch für die Geschwindigkeit der freie Fall der Leiterschleife zu berücksichtigen, so dass man letztlich den folgenden Ausdruck erhält: $$U(t) = B \cdot b \cdot g \cdot t = 6{,}278\ \frac{\mathrm{V}}{\mathrm{s}} \cdot t$$	2	6	
e	In der kurzgeschlossenen Leiterschleife hat die induzierte Spannung einen Strom zur Folge. Daher wirkt auf den Leiter zusätzlich zur beschleunigenden Gewichtskraft noch die Lorentzkraft. Nach der Lenzschen Regel, ist diese der Ursache entgegengesetzt. Die beiden Kräfte heben sich also teilweise auf, und die Beschleunigung der Schleife wird geringer. Im Grenzfall heben sich die Kräfte ganz auf und es kommt zur gesuchten Grenzgeschwindigkeit v_0. $$IbB = mg \qquad \text{mit} \qquad I = \frac{U_{ind}}{R} = \frac{Bbv_0}{R}$$ $$\frac{Bbv_0}{R} bB = mg$$ $$v = \frac{mgR}{B^2 b^2}$$ $$= 23{,}95 \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$$ Evtl. wird es naheliegender sein, zunächst die beschleunigende Kraft und damit die Beschleunigung selbst in Abhängigkeit von der Zeit zu bestimmen. Man erhält dann durch Integration das Geschwindigkeits-Zeit-Gesetz und mittels Grenzwertbildung die Geschwindigkeit v_0. Dieser naheliegende Ansatz ist jedoch mathematisch schwieriger. Für die Bewertung ist diese Lösung gleichberechtigt.		2	6
	Summe	**14**	**20**	**6**

A2: Elektrisches und magnetisches Feld

Auf-ga-be	Lösung	Anforderungsbereich I	II	III
A2-1. a.	Skizze der Glühwendel und des Beschleunigungskondensators mit elektrischen Anschlüssen in einer Vakuumröhre. Durch den glühelektrischen Effekt werden Elektronen aus der Glühwendel emittiert, die dann als freie Elektronen im elektrischen Feld des Beschleunigungskondensators abgesaugt und zur Anode beschleunigt werden. Durch ihre Trägheit fliegen die Elektronen durch das Loch in der Anode. An den geladene Teilchen wird die Beschleunigungsarbeit $W_E = Q \cdot U$ verrichtet. Die kinetische Energie ist durch den Term $E_{kin} = 1/2 \cdot m \cdot v^2$ gegeben. Für die kinetische Energie der Elektronen gilt nach dem Durchlaufen des Beschleunigungskondensators $E_{kin} = W_E$ und es folgt: $\frac{1}{2} m_e v^2 = e \cdot U_B \Leftrightarrow v = \sqrt{\frac{2e \cdot U_B}{m_e}}$.	10		

b.	Die im Magnetfeld wirkende Lorentzkraft ist immer senkrecht zur Bewegungsrichtung gerichtet und wirkt als Zentralkraft der Kreisbahn. Mit dem Argument, dass die Kraft an jeder Stelle der Bahn - auch im zylindrischen Plattenkondensator - senkrecht zur Geschwindigkeit steht, folgt, dass keine Arbeit verrichtet wird. Die Folge ist die Konstanz des Betrages der Geschwindigkeit.		4	
c.	Aus dem Ansatz, dass die Lorentzkraft die wirkende Zentralkraft im Magnetfeld ist, ergibt sich der Term $v=\frac{q\cdot B\cdot r}{m}$ für die Geschwindigkeit. Der Ansatz, dass elektrische Kraft die Zentralkraft im elektrischen Feld ist, liefert dem Term $m=\frac{q\cdot E\cdot R}{v^2}$ für die Masse und die Zusammenfassung ergibt $v=\frac{E\cdot R}{B\cdot r}$ und $m=\frac{q\cdot B^2\cdot r^2}{E\cdot R}$.		6	3
d.	Aus den gegeben Daten ergibt sich $E=\frac{10{,}68\cdot 10^3 V}{0{,}02m}=5{,}34\cdot 10^5\frac{V}{m}$. Es folgt weiter: $v=\frac{5{,}34\cdot 10^5 V/m\cdot 2m}{7{,}76\cdot 10^{-3}T\cdot 0{,}5m}\approx 2{,}75\cdot 10^8\frac{m}{s}$ und $m=\frac{1{,}60\cdot 10^{-19}C\cdot\left(7{,}76\cdot 10^{-3}T\right)^2\cdot\left(0{,}5m\right)^2}{5{,}34\cdot 10^5 V/m\cdot 2m}\approx 2{,}26\cdot 10^{-30}kg$	1	4	
e.	Mit dem Wert aus Teil d) für die Geschwindigkeit ergibt sich für die Masse $m=\frac{m_0}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}=\frac{9{,}11\cdot 10^{-31}kg}{\sqrt{1-\frac{\left(2{,}75\cdot 10^8\frac{m}{s}\right)^2}{\left(3{,}00\cdot 10^8\frac{m}{s}\right)^2}}}\approx 2{,}28\cdot 10^{-31}kg$. Die Abweichung der Werte beträgt weniger als 1%.	1	2	
f.	Die Berechnung $E_{kin}=\left(2{,}28\cdot 10^{-30}kg-9{,}11\cdot 10^{-31}kg\right)\cdot\left(3{,}00\cdot 10^8\frac{m}{s}\right)^2\approx 1{,}23\cdot 10^{-13}J$ $E_{kin}=1{,}23\cdot 10^{-13}J\approx 770keV$ Die kinetische Energie der Elektronen beträgt ca. 770 keV und es ergibt sich die Beschleunigungsspannung von 770 kV		3	1
g.	Die Richtung der beiden ablenkenden Felder müsste umgedreht werde, da die Protonen positiv geladen sind. Ein Proton ist ungefähr 1800 mal so schwer wie ein Elektron bei gleichem Betrag der Ladung. Um das Proton auf die gleiche Geschwindigkeit zu beschleunigen, müsste also nach den Überlegungen aus Teil a) die Beschleunigungsspannung um diesen Faktor erhöht werden. Nach den Überlegungen aus Teil c) müsste das Magnetfeld um den gleichen Faktor stärker werden, damit der Radius r gleich bleibt. das gleiche ergibt sich für die elektrische Feldstärke E, damit der Radius R erhalten bleibt.		1	4
	Summe: 40	**12**	**20**	**8**

B1: Mechanische und elektromagnetische Schwingungen und Wellen

<table>
<tr><th rowspan="2">Auf-ga-be</th><th rowspan="2">Lösung</th><th colspan="3">Anforderungs-bereich</th></tr>
<tr><th>I</th><th>II</th><th>III</th></tr>
<tr><td>B1-1. a.</td><td>F_R ergibt sich zu $F_R = 2s\cdot\rho Ag$ aus der „zusätzlichen“ Masse in einem Schenkel. Daraus folgt F_R ist proportional zu s und damit ist die Schwingung harmonisch, da F_R zur Ruhelage gerichtet ist.</td><td>0</td><td>4</td><td>2</td></tr>
<tr><td>b.</td><td>Z. B. Lösung über den Ansatz „rücktreibende Kraft ist beschleunigende Kraft“
$m\cdot\ddot{s} = 2\rho Ag\cdot s$ liefert mit $m = \rho\cdot l\cdot A$ die Dgl. $\ddot{s} + \frac{2g}{l}s = 0$.
Lösungsansatz: $s(t) = s_0\sin(\omega\ t + \varphi_0)$ oder $s(t) = s_0\cos(\omega\ t + \varphi_0)$ ergeben $\omega^2 = \frac{2g}{l}$ und damit $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{2g}}$</td><td>6</td><td>6</td><td>0</td></tr>
<tr><td>c.</td><td>Das Ablesen von 1,5 Schwingungsdauern bei den Nulldurchgängen liefert $1{,}5\cdot T_{exp} \approx 3{,}2$ s und es folgt $T_{exp} \approx 2{,}13$ s.
Aus dem Diagramm kann man die ersten 5 Maxima ablesen, wobei der letzte Wert sehr ungenau ist. Durch Berechnung der Quotienten der Maxima oder der Differenz der Logarithmen der Maxima lässt sich der Nachweis auf exponentielle Abnahme führen. Mit diesen oder ähnlichen Methoden lässt sich der Mittelwert der Dämpfungskonstanten k ermitteln.
<table><tr><td>t</td><td>0·T</td><td>0,5·T</td><td>1·T</td><td>1,5·T</td><td>2·T</td></tr><tr><td>s_{max}</td><td>10</td><td>3,45</td><td>1,2</td><td>0,4</td><td>0,15</td></tr><tr><td>ln(smax)</td><td>2,30</td><td>1,24</td><td>0,18</td><td>-0,92</td><td>-1,90</td></tr></table>Die Differenzen der Logarithmen sind nahezu konstant und liefern den Mittelwert 1,05. Für k ergibt sich: $k = \frac{1{,}05}{0{,}5T} \approx 0{,}99\frac{1}{s}$.
Es ergibt sich das folgende s(t)-Gesetz: $s(t) \approx 0{,}1m\cdot e^{-0{,}99\frac{t}{s}}\cos(\frac{2\pi}{2{,}13s}t)$.
Für den theoretischen Wert der Schwingungsdauer ergibt sich
$T_{theor} = 2\pi\sqrt{\frac{2m}{2\cdot 9{,}81\frac{m}{s^2}}} \approx 2{,}01s$. Die Abweichung von theoretischem und experimentellen Wert beträgt ca. 6%. Dies könnte zum einen an Messfehlern liegen. Es ist aber zu berücksichtigen, dass die Schwingung stark gedämpft ist. Dadurch wird die Schwingungsdauer aber vergrößert, so dass die Abweichung eine Folge der Dämpfung ist..</td><td>6</td><td>10</td><td>2</td></tr>
<tr><td>d.</td><td>Der linke Teil des Gefäßes hat keinen konstanten Querschnitt mehr; A hängt von der Auslenkung s ab. Dadurch ergibt sich für die rücktreibende Kraft $F_R = 2\cdot\rho\cdot g\cdot s\cdot A(s)$, dass F_R nicht mehr proportional zur Auslenkung s ist. Diese Schwingung ist nicht mehr harmonisch.</td><td></td><td></td><td>4</td></tr>
<tr><td></td><td>Summe: 40</td><td>12</td><td>20</td><td>8</td></tr>
</table>

B2: Mechanische und elektromagnetische Schwingungen und Wellen

Teilaufgabe	**Lösung**	**AE I**	**AEII**	**AE III**
	Voraussetzung: Mechanische Schwingungen und akustische Wellen, Umgang mit Oszilloskopbildern und Dopplereffekt			
1.a.	Interpretation des Oszilloskopbild λ = 6,5cm, daraus folgt: T=1,95ms und f= 1/T = 512,82 Hz	2	2	
1.b.	Signal legt bis M2 längeren Weg zurück, trifft also später ein. Verzögerung Δt= T/2 ; aus c= M1M2/ Δt folgt c= 334,9 m/sec	2	4	
1.c.	Wenn die Frequenz verdoppelt wird, beträgt der Abstand M1M2 genau λ , d.h. die Signale in M1 und M2 sind wieder in Phase, aber die doppelte Frequenz ergibt eine Stauchung (Faktor ½) auf dem Schirmbild.		4	2
1.d.	Stehende Wellen durch gegeneinander laufende Wellen; in der Mitte ein Maximum, d.h. die Lautsprecher schwingen gleichphasig; 12 Minima heißt 12 Halbwellen zwischen 0 und 24 cm: $12 \cdot \lambda/2$ = 24 cm, daraus folgt: λ = 4 cm. Aus c= f$\cdot\lambda$ folgt f= 8500Hz	2	4	2
1.e.	Aus $T= 2\pi\sqrt{\frac{m}{D}}$ ergibt sich T= 2sec. Also $\omega = \pi$ sec^{-1} , für t=0 soll s= -s_0 = -32 cm sein. Dann gilt für die Geschwindigkeit des schwingenden Körpers v (t)= $\omega\, s_0 \sin(\omega t)$. v(0) = 0, v(T/4)= 1,005m/sec, v(T/2)=0, v(3T/4)= - 1,005m/sec. Nach den Formeln für Dopplereffekt (ruhender Sender und bewegter Empfänger) gilt $f=f_0\,(1- v(t)/c)$. Die registrierten Frequenzen sind: f(0)=8500Hz =f(T/2), f(T/4)= 8476 Hz, f(3T/4)= 8517 Hz.	2	8	6
	Gesamtpunktzahl ∑ = 40	**8**	**22**	**10**

C1: Atom- und Quantenphysik

Lösung		**BE I**	**BE II**	**BE III**
a.	Die Beschreibung des Experiments ist von dem im Unterricht durchgeführten Experiment abhängig. Die maximale kinetische Energie E_{kin} der Elektronen kann entweder aus einer angelegten Gegenspannung bestimmt werden, bei der der Photostrom null wird oder aus der mit einem Operationsverstärker gemessenen Spannung eines Kondensators, der von den Photoelektronen aufgeladen wird. In beiden Fällen ist E_{kin} gleich der potentiellen Energie eU im elektrischen Feld.	4		
b.	1. Die maximale kinetische Energie der ausgelösten Elektronen ist unabhängig von der Intensität der einfallenden Strahlung. 2. Es tritt eine Grenzfrequenz auf, unterhalb der keine Elektronen auch bei beliebig großer Intensität ausgelöst werden können. 3. Der Photostrom setzt auch bei geringer Intensität sofort mit dem Einfallen der Strahlung ein, während nach klassischer Rechnung erst eine bestimmte Zeit vergehen sollte, bis die elektromagnetische Welle die Elektronen zu so starken Schwingungen anregt hat, dass diese austreten können. Einstein nahm eine Quantelung der Energie der einfallenden Strahlung an, wobei die gesamte Energie eines Quants allein auf ein einzelnes Elektron übertragen wird.	4		
c.	Die Auftragung der Spannung U über der Frequenz f ergibt einen linearen Zusammenhang. Die Gerade schneidet die Rechtsachse bei der Grenzfrequenz f_G. Aus der Steigung m der Geraden kann die Planck'sche Konstante h berechnet werden und aus dem negativen Abschnitt auf der Hochachse die Austrittsenergie E_A. Bei Wahl der beiden am weitesten auseinander liegenden Messwerte zur Berechnung von $m = \Delta U / \Delta f = h / e$ (diese Wahl wird durch den Graphen nahe gelegt) erhält man $\frac{\Delta U}{\Delta f} = 0{,}416 \cdot 10^{-14}\,\mathrm{Vs}$ und daraus $h = e \cdot 0{,}416 \cdot 10^{-14}\,\mathrm{Vs} = 6{,}66 \cdot 10^{-34}\,\mathrm{Js}$. Aus der Gleichung der Geraden $U = \frac{h}{e} f - E_A$ ergibt sich bei Einsetzen der Wertepaare $(f_i \mid U_i)$ als mittlerer Wert die Austrittsenergie zu $E_A = \frac{h}{e} f - U = 3{,}55 \cdot 10^{-19}\,\mathrm{J} = 2{,}2\,e\mathrm{V}$. Für $U = 0$ folgt damit für die Grenzfrequenz $f_G = \frac{e E_A}{\mathrm{h}} = 5{,}34 \cdot 10^{14}\,\mathrm{Hz}$.		15	
d.	1. Die auf ein Elektron übertragene Energie bleibt konstant, da sie nur von der Energie des einzelnen absorbierten Photons abhängt. Der Photostrom verdoppelt sich, da doppelt so viele Elektronen ausgelöst werden. 2. Die Energie eines Elektrons erhöht sich, da sich die Energie eines Photons erhöht. Der Photostrom sinkt, da sich die pro Zeit und Fläche eingestrahlte Energie auf weniger Photonen verteilt und somit weniger Elektronen ausgelöst werden.	3		3

e.	Die wirksame Strahlungsleistung ist $P = 32\,\frac{\text{mW}}{\text{cm}^2} \cdot \frac{12{,}5}{100} \cdot 0{,}5\text{cm}^2 = 2\text{mW}$. Für die Stromstärke erhält man damit $I = \frac{Q}{t} = \frac{n\,E_{\text{Ph}}\;e}{t\,E_{\text{Ph}}} = \frac{P\;e}{E_{\text{Ph}}} = \frac{0{,}002\,\text{W} \cdot 1{,}602 \cdot 10^{-19}\,\text{C}}{6{,}626 \cdot 10^{-34}\,\text{Js} \cdot \frac{3 \cdot 10^8\,\text{m/s}}{545\ \text{nm}}} = 879\,\mu\text{A}$.		6	
f.	Aus den beiden Gleichungen $eU_{1,2} = h\,f_{1,2} - E_{\text{A}}$ folgt $\frac{U_1}{U_2} = \frac{h\,f_1 - E_{\text{A}}}{h\,f_2 - E_{\text{A}}} = 3{,}2$. Wird diese Gleichung nach E_{A} aufgelöst, so folgt $E_{\text{A}} = \frac{h\,c}{3{,}2-1}\left(\frac{3{,}2}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1}\right) = \frac{6{,}67 \cdot 10^{-34}\ \text{Js} \cdot 3 \cdot 10^8\ \text{m/s}}{2{,}2}\left(\frac{3{,}2}{680\,\text{nm}} - \frac{1}{440\,\text{nm}}\right) = 2{,}21 \cdot 10^{-19}\,\text{J}$ $= 1{,}38\,e\text{V}$			5
	Summe: 40	**11**	**21**	**8**

C2: Atom- und Quantenphysik

Teil-aufgabe	**Erwartete Schülerleistung**	**BE** I	**II**	**III**
a.	Interferenzversuche am Doppelspalt, am Gitter und am Einzelspalt sind typische Versuche, die man nur mit dem Wellenmodell erklären konnte. Um die Ausbreitung des Lichts zu verstehen, braucht man die von Christian Huygens erkannte Beugung und Interferenz der Lichtwellen. Für die Wechselwirkung des Lichts mit Materie benötigte man das Teilchenmodell. So konnte der äußere lichtelektrische Effekt nur mit der von Albert Einstein begründeten Lichtquantenhypothese erklärt werden.	6		
b.	Die Formel $E = m\,c^2$ besagt, dass Photonen aufgrund ihrer Energie $E = h\,f$ auch Masse m besitzen: $m = \frac{E}{c^2} = \frac{h\,f}{c^2}$. Da sich Photonen mit Lichtgeschwindigkeit c bewegen, haben sie nach der Formel $p = m\,v$ den Impuls $p = m\,c$. Damit folgt für den Impuls der Photonen $p = \frac{E}{c^2}\,c = \frac{h\,f}{c} = \frac{h}{\lambda}$. Energie eines Photons bei grünem Licht $E = h\,f = \frac{hc}{\lambda} = \frac{hc}{\lambda e}e = \frac{6{,}63 \cdot 10^{34}\ \text{Js} \cdot 3 \cdot 10^8\,\text{m/s}}{550\,\text{nm} \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \text{As}}e = 2{,}26\,e\text{V}$ Damit folgt für den Impuls eines Photons bei grünem Licht $p = \frac{E}{c} = 2{,}26\ \frac{e\text{V}}{c}$	4	6	

c.	Elektrische Feldstärke $E=\sqrt{S\sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}}}=\sqrt{S\sqrt{\frac{\mu_0}{1/(\mu_0 c^2)}}}=\sqrt{\mu_0\, c\, S}=\sqrt{4\pi\cdot 10^{-7}\,\frac{\text{Vs}}{\text{Am}}\cdot 3\cdot 10^8\,\frac{\text{m}}{\text{s}}\cdot 1{,}39\frac{\text{kW}}{\text{m}^2}}$ $=724\ \text{V/m}$ Es gilt $S=\frac{P}{A}=\frac{\Delta N\ E_{Photon}}{\Delta t\ \pi R^2}$. Daraus folgt $\Delta N=\frac{S\ \ \pi R^2\ \ \Delta t\ \ \lambda}{h\ c}$; Werte eingesetzt, ergibt $\Delta N=\frac{1{,}39\ \text{kW/m}^2\cdot\pi\cdot(6370\,\text{km})^2\cdot 1\,s\cdot 550\,\text{nm}}{6{,}63\cdot 10^{-34}\ \text{Js}\cdot 3\cdot 10^8\ \text{m/s}}=4{,}9\cdot 10^{35}$ Für die Quantenphysik ist die Intensität S und damit das Quadrat der elektrischen Feldstärke E einer elektromagnetischen Welle ein Maß für die Wahrscheinlichkeit p ein Photon in einem bestimmten Raumbereich zu registrieren. Bei hoher Intensität S und damit hoher Photonenrate $\Delta N/\Delta t$ kann kein Unterschied der beiden Berechnungen experimentell festgestellt werden, Ist die Intensität jedoch gering, sodass z.B. nur 10 Photonen pro Sekunde auf einen Quadratmeter treffen, so kann keine Aussage darüber gemacht werden, an welchen Orten genau die Photonen auftreffen werden. Dies beruht nicht auf einer Unkenntnis der genauen Verteilung der elektromagnetischen Welle sondern ist objektiv unbestimmt.	6	6	
d.	Für die Masse eines Photons des grünen Lichts folgt $m_{\text{Licht}}=\frac{h\,f}{c^2}=\frac{h}{c\,\lambda}=\frac{6{,}63\cdot 10^{-34}\ \text{Js}}{3\cdot 10^8\ \text{m/s}\cdot 550\,\text{nm}}=4{,}02\cdot 10^{-36}\ \text{kg}=4{,}4\cdot 10^{-6}\ m_e$. Die Photonenmasse m_{Photon} beträgt nur einige Millionstel der Elektronenmasse m_e. Bei einem Stoß, bei dem das Photon nicht absorbiert werden soll, kann das Photon keine Energie auf das Elektron übertragen. Es behält daher seine Energie E=h f und damit auch seine Frequenz f. Die Farbe des gestreuten Lichts bleibt unverändert. Die gleiche Rechnung liefert für die Masse eines Röntgenphotons $m_{\text{Röntgen}}=m_{\text{Licht}}\frac{\lambda_{\text{Licht}}}{\lambda_{\text{Röntgen}}}=4{,}41\cdot 10^{-6}\ m_e\ \frac{550\,\text{nm}}{8\,\text{pm}}=0{,}303\,m_e$. Beträgt die Photonenmasse 30 % der Elektronenmasse, so wird bei einem Stoß das stoßende Photon Energie an das Elektron abgeben. Das gestreute Photon hat demnach weniger Energie und die gestreute Röntgenstrahlung ist langwelliger.		6	
e.	Der Compton-Effekt beschreibt die Streuung von Röntgenstrahlung an Elektronen, wenn diese sich bei dem Stoß wie ungebundene Elektronen verhalten. Da die Masse der Photonen von der Größenordnung der Elektronenmasse ist, kommt es zu einem Impuls- und Energieübertrag an das Elektron, sodass die gestreute Röntgenstrahlung energieärmer und damit weicher ist. Die Verschiebung der Wellenlänge $\Delta\lambda=\frac{h}{m_e\ c}(1-\cos\varphi)=2{,}43\,\text{pm}\,(1-\cos\varphi)$			

	ist unabhängig von der Wellenlänge λ der gestreuten Strahlung und hängt nur vom Streuwinkel φ ab. Die kinetische Energie E_{kin}, die das Elektron erhält, ist gleich der Energiedifferenz $\Delta E = h(f - f')$ der Photonen vor und nach dem Stoß. Für $\varphi = 90°$ folgt: $E_{kin} = h(f - f') = hc(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda'}) = \frac{hc}{e}(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda + \Delta\lambda}) \cdot e$ $= \frac{6{,}626 \cdot 10^{-34}\,\mathrm{Js} \cdot 3 \cdot 10^{8}\,\mathrm{m/s}}{1{,}6 \cdot 10^{-19}\,\mathrm{As}}(\frac{1}{8\,\mathrm{pm}} - \frac{1}{(8 + 2{,}43)\mathrm{pm}}) \cdot e = 36{,}1\,\mathrm{keV}$ (Das sind 7,1 % der Ruheenergie $E_0 = 511$ keV des Elektrons.)			6
	Summe: 40	**16**	**18**	**6**