Abitur 2008 - Physik Lösungshinweise.

Die Lösungshinweise erheben nicht den Anspruch, den einzigen und kürzesten Lösungsweg aufzuzeigen. Sie sind auch nicht als vollständige mathematische Lösung gedacht, sondern sollen den Schülerinnen und Schülern Denkanstöße beim Lösen der Aufgaben geben, bzw. die wichtigsten physikalischen Gedankengänge aufzeigen. Die genannten Ergebnisse sind ohne Gewähr.
Sollten Sie offensichtliche Fehler entdecken, dann bitten wir um Nachricht.

Diese Lösungshinweise sind aus rechtlichen Gründen auch nicht mit den Lösungsvorschlägen identisch, welche die Fachlehrerinnen und Fachlehrer als Auswahl- und Korrekturhilfe erhalten haben, sondern wurden von Mitarbeitern des Landesbildungsservers erstellt.

Aufgabe I:

I.a)

Strahlerzeugung:

Aus einer beheizten Glühwendel treten Elektronen aus (glühelektrischer Effekt).
Diese Wendel kann auch als Kathode verwendet werden. Zwischen der Glühwendel und einem Anodenblech wird eine Spannung angelegt, wobei die Glühwendel mit dem Minuspol und die Anode mit dem Pluspol einer Quelle verbunden wird. Die Elektronen werden dann zum Anodenblech hin beschleunigt und treffen schließlich durch ein Loch im Anodenblech und verlaufen weiter durch den Rest der Anordnung.
Man kann auch eine "richtige Kathode" aus einem Material verwenden, das leicht Elektronen abgibt. Dieses Kathodenblech wird dann von einer Glühwendel geheizt, so dass Elektronen aus ihm austreten können (indirekte Heizung).
Häufig wird der Elektronenstrahl noch durch weitere Elektroden oder durch einen negativ geladenen Zylinder zwischen Kathode und Anode (Wehnelt-Zylinder) gebündelt.
Diese Art der Strahlerzeugung ist in Bildröhren üblich.

Vergleiche hierzu auch folgende Seite auf dem Landesbildungsserver.

Beschleunigungsspannung:

Die Elektronen erhalten beim Durchlaufen einer Spannung U die Energie W = e * U. Diese Energie bekommen sie in Form von kinetischer Energie. Für diese gilt: $W = 1/2 * m_e * v^2$. Setzt man die beiden Gleichungen gleich, löst nach U auf und setzt die Werte ein, so erhält man als Ergebnis 4,56 kV.

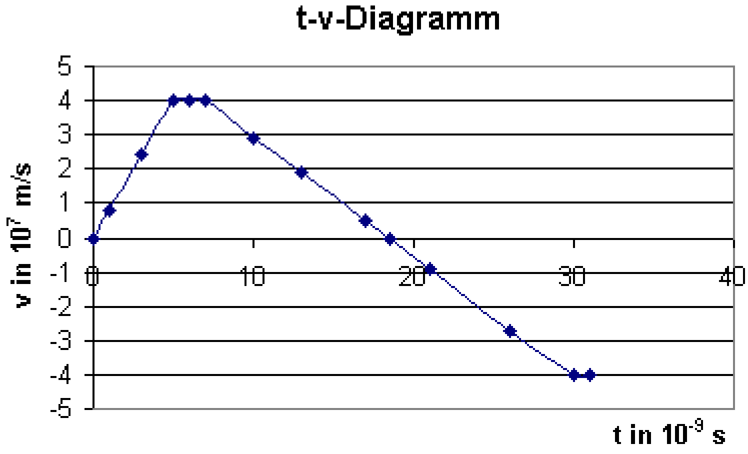
Vergleiche hierzu auch folgende Seite auf dem Landesbildungsserver.

t-v-Diagramm:

Trägt man die Werte aus der Tabelle auf, so bekommt man folgenden Geschwindigkeitsverlauf:

Interpretation:

0 ns < t < 5 ns
In den ersten 5 ns befinden sich die Elektronen im Strahlerzeugungssystem. Durch die



angelegte Spannung zwischen Kathode und Anode ergibt sich im Kondensator ein *konstantes* elektrisches Längsfeld und damit eine *konstante* elektrische Kraft. Die Elektronen werden dadurch *konstant* beschleunigt, daher nimmt ihre Geschwindigkeit *linear* auf $4{,}0 \cdot 10^7$ m/s zu.

5 ns < t < 7 ns
Zwischen 5 ns und 7 ns bewegen sich die Elektronen mit konstanter Geschwindigkeit. Sie haben das Strahlenerzeugungssystem verlassen und befinden sich auf dem Weg zur Black-Box.

7 ns < t < 18,5 ns
In der Black-Box nimmt die Geschwindigkeit der Elektronen zwischen 7 ns und 18,5 ns linear bis auf Null ab. Sie führen also eine *Bewegung mit konstanter Verzögerung* aus, ähnlich einer Bremsbewegung bei einem Fahrzeug. Dies setzt eine konstante Gegenkraft voraus. Im Inneren der Box muss nun also ein elektrisches Feld parallel zur x-Achse wirken. Es zeigt in die Richtung der positiven x-Achse, die elektrische Kraft in Richtung der negativen x-Achse.

18,5 ns < t < 31 ns
Nach 18,5 ns erhalten die Elektronen wieder eine Geschwindigkeit, aber mit negativem Vorzeichen, d.h. sie bewegen sich nun wieder in Richtung des Strahlerzeugungssystems (also nach links).
Die gleiche Feldkraft, die zuvor zur Abbremsung geführt hat, beschleunigt die Elektronen nun in Gegenrichtung und sie verlassen die Black-Box wieder in R mit dem gleichen Geschwindigkeitsbetrag, mit dem sie in die Black-Box eingetreten sind, jedoch nach links.

Vergleiche hierzu auch folgende Seite auf dem Landesbildungsserver.

I.b)

Orientierung der Felder:

In elektrischen oder magnetischen Feldern wirken Kräfte auf geladene Teilchen wie Elektronen. Damit die Elektronen die Black-Box geradlinig durchlaufen, müssen sich diese Kräfte gerade aufheben, denn nur so werden sich Betrag und Richtung der Elektronengeschwindigkeit nicht ändern. Die elektrische Kraft muss also gleich groß wie die Lorentzkraft sein. Das ist z.B. so, wenn die magnetische Flussdichte senkrecht in die Zeichenebene hinein orientiert ist und das elektrische Feld in die negative y-Richtung weist (elektrische Kraft auf Elektronen wirkt dann nach oben). Natürlich können beide Felder auch genau umgekehrt orientiert sein (also E-Feld in positive y-Richtung, elektrische Feldkraft in negative y-Richtung). Dann wirkt die Lorentzkraft in die positive y-Richtung, dazu muss das Magnetfeld aus der Zeichenebene heraus - auf den Betrachter zu - zeigen.
Man nennt diese Anordnung ein *Wien-Filter*

Vergleiche hierzu auch folgende Seite auf dem Landesbildungsserver.

Elektrische Feldstärke E:

Für die elektrische Feldstärke in einem Plattenkondensator gilt: $E = U / d$. Mit den gegebenen Werten (1500 V und 0,60 m) ergibt sich 2,5 kV/m.

Magnetische Flussdichte:

Damit die Elektronen geradeaus fliegen, muss die elektrische Feldkraft den gleichen Betrag haben wie die Lorentzkraft.
Es muss also gelten $e * E = e * v_o * B$ bzw. $B = E / v_o$. Man erhält als Ergebnis 62,5 µT.

Geradeausflug nur mit einem Magnetfeld:

Ist die Richtung eines Magnetfeldes gleich orientiert wie der Geschwindigkeitsvektor des Elektrons, dann tritt keine Lorentzkraft auf. Das Magnetfeld muss dazu also in positiver x-Richtung oder negativer x-Richtung orientiert sein.

Einfluss auf die Geschwindigkeit:

Wenn keine Lorentzkraft wirkt, wird das Elektron weder abgelenkt noch beschleunigt oder gebremst. Der Betrag seiner Geschwindigkeit ändert sich also nicht.

I.c)

$a_1 = 90°$

In diesem Fall wirkt nur ein Magnetfeld.
Die Lorentzkraft muss in Richtung der positiven y-Achse weisen, also zeigt der B-Feld-Vektor aus der Zeichenebene heraus auf den Betrachter zu.
Die Lorentzkraft wirkt als Zentripetalkraft und sorgt dafür, dass die Elektronen sich auf einer Kreisbahn bewegen. Der Vektor der Bahngeschwindigkeit ist dabei immer tangential an die Kreisbahn orientiert und der Geschwindigkeitsbetrag ändert sich nicht.
Um die Black-Box in T zu verlassen, müssen die Elektronen einen Viertelkreis mit Radius 30 cm durchlaufen.

Vergleiche hierzu auch folgende Seite auf dem Landesbildungsserver.

$a_2 < 90°$

In diesem Fall bewegen sich die Elektronen auf einer Parabelbahn und es wirkt nur ein elektrisches Feld, das in Richtung der negativen y-Achse weist.
Zusätzlich zur gleichförmigen Bewegung in x-Richtung kommt dann noch eine gleichmäßig beschleunigte Bewegung in Richtung der positiven y-Achse hinzu. Beides gemeinsam führt zur Parabelbahn.

Vergleiche hierzu auch folgende Seite auf dem Landesbildungsserver.

Elektrische Feldstärke E:

Die beiden Bewegungen überlagern sich.
In x-Richtung bewegen sich die Elektronen mit der konstanten Geschwindigkeit $v_x = v_o$ die Strecke $s_x = 30$ cm weit.
Dafür benötigen sie die Zeit $t = s_x / v_x = 7{,}5 * 10^{-9}$ s.

Während dieser Zeit wirkt auf sie die elektrische Feldkraft in Richtung der y-Achse ein. Sie bewegen sich dabei um s_y = 30 cm. Weiterhin gelten folgende Gleichungen: $s_y = 1/2 * a * t^2$ und $e * E = F_{el} = m * a$.

Daraus folgt für die elektrische Feldstärke $E = (2 * m * s_y) / (e * t^2)$. Als Ergebnis erhält man 60,7 kV/m.

I.d)

Bahnradius:

Die elektrische Kraft wirkt bei diesem besonderen Plattenkondensator immer senkrecht zur Bewegungsrichtung der Elektronen. Sie wirkt daher als Zentripetalkraft und bringt die Elektronen auf eine Kreisbahn.

Es gilt: $F_{el} = F_z$ und weiter $e * E = (m * v^2) / r$.
Damit ergibt sich $r = (m * v^2) / (e * E)$.
Als Radius bekommt man dann 1,25 m.

Bahnabweichung:

Die Masse der Elektronen verändert sich mit der Geschwindigkeit, sie nimmt mit steigender Geschwindigkeit zu, denn in der Gleichung für die relativistische Massenkorrektur wird der Nenner immer kleiner, wenn v größer wird.
Bei gleicher Geschwindigkeit ist also nun die nötige Zentripetalkraft größer, d.h. auch die elektrische Kraft müsste größer sein. Die Elektronen weichen nach außen von der Kreisbahn ab und prallen u.U. auf die obere Platte.

IIa.)

Kapazität des Kondensators

Für die Kapazität eines Plattenkondensators gilt: $C = e_o * e_r * A / d$.
Mit den angegebenen Werten (r = 0,12 m, also A = p * r^2 = 0,045 m^2, d = 0,02 m) ergibt sich $2*10^{-11}$ F also 20 pF.

Bestimmung der elektrischen Feldstärke

Wird der Kondensator wieder von der Quelle getrennt, so kann weder Ladung auf die Platten fließen noch von den Platten herunter. Die Ladungsmenge bleibt dadurch konstant.
Dadurch ändert sich auch die elektrische Feldstärke E nicht, denn diese ist der felderzeugenden Ladung Q proportional. Dies gilt allerdings nur, solange der Plattenabstand nicht zu groß wird, denn dann wird das elektrische Feld an den Rändern der Platten inhomogen.

Vergleiche hierzu auch folgende Seite auf dem Landesbildungsserver.

Versuchsaufbau:

Idee, Skizze und Herleitung wird auf dieser Seite des Landesbildungsservers dargestellt. In dieser Art wurde die Entwicklung und Herleitung erwartet.

Bleibt die Probeladung q auf dem Kügelchen, so ist die elektrische Feldstärke E proportional zur auslenkenden Kraft F_{el} auf das Kügelchen.

Verändert man also die Lage des Kügelchens im Kondensator (in der Praxis wird man den Kondensator verschieben) und stellt stets gleichen Ausschlag fest, dann ist auch die elektrische Kraft und damit das elektrische Feld überall gleich.
Bis auf die Randzonen ist dies der Fall.

IIb.)

Zuordnung der Messkurven

Für die Ladungsmenge Q auf den Platten des Kondensators gilt Q = C * U. Bei gleicher angelegter Spannung U bestimmt also die Kapazität C wie viel Ladung auf die Platten passt.
Ladungsmenge Q und Spannung U sind also proportional, es ergeben sich Ursprungsgeraden, deren Steigung C die Kapazität des jeweiligen Kondensators ist.
Wegen C = e_o * e_r * A / d (vgl. IIa) führt ein kleinerer Plattenabstand d zu einer größeren Kapazität C und damit zu einer größeren Steigung im U-Q-Diagramm. Damit gehört also die Kurve A zum kleineren Plattenabstand d_1 und B zum größeren Plattenabstand d_2.

Warum enden die Messkurven?

Bei einer bestimmten Spannung U passt eine bestimmte Ladungsmenge Q auf den Kondensator.
Je größer man die Spannung wählt, desto mehr Ladung passt auf die Platten.
Man kann die Spannung aber nun nicht beliebig erhöhen, denn ab einer gewissen Grenze wirkt die Luft nicht mehr als Isolator und es gibt einen "Durchschlag" zwischen den Platten.
Deshalb ist auch die maximale Ladungsmenge auf den Platten prinzipiell begrenzt und die Geraden enden daher.

Ergänzung zur Frage (nicht Bestandteil der Antworten):

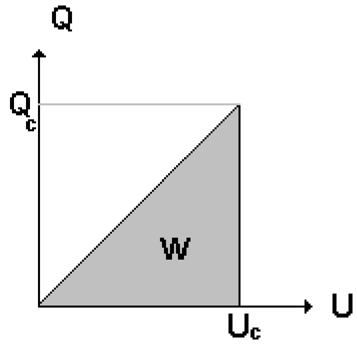
In einer Diskussion über diese Frage in einem 4-stündigen 12er Kurs kamen folgende Fragen auf:

Frage: Warum endet die Kurve B bei einer höheren Spannung als die Kurve A?
Die Kurve B gehört zum Plattenkondensator mit dem größeren Plattenabstand. Je weiter die Platten auseinander sind, desto weniger leicht ist ein Durchschlag in Luft möglich, daher kann dann eine größere Spannung an den Platten sein.

Frage: Ist es Zufall, dass beide Kurven beim gleichen Wert von Q enden?
Sicher nicht, die Ladungen "sitzen" dann in beiden Fällen "gleich dicht" auf den Kondensatorplatten.
Man kann das aber auch noch anders formulieren.
Für den luftgefüllten Kondensator gilt: Q = e_o * A / d * U = e_o * A * U / d = e_o * A * E.
Das bedeutet, dass die Ladungsmenge Q und die elektrische Feldstärke E direkt proportional sind.
Wenn nun beide Kurven bei der gleichen Ladung Q enden, dann bedeutet das auch, dass der Überschlag auch bei der gleichen elektrischen Feldstärke E einsetzt.
Bei welcher Feldstärke dies passiert, hängt von der Beschaffenheit der Oberflächen ab. Bei glatten Flächen - wie bei einem Kondensator - passiert dies erst bei deutlich größerer Feldstärke als beispielsweise bei Spitzen.

Herleitung der Energie eines Kondensators

Die Fläche unter der Kurve im U-Q-Diagramm ist ein Maß für die im Kondensator gespeicherte Energie. Für die Fläche des Dreiecks ergibt sich W = 1/2 * U_c * Q_c. Mit Q = C * U erhält man dann $W = 1/2 * C * U^2$.



Vergleiche hierzu auch folgende Seite auf dem Landesbildungsserver.
(Auf dieser Seite wurden die Achsen von Q und U vertauscht um die Analogie zum Spannen einer Feder besser zeigen zu können. Für die Fläche unter der Kurve ist das aber ohne Belang)

Leuchtdauer der Diode

Der Kondensator hat bei maximaler Spannung (3,0 V) folgende Energie gespeichert:
$W_1 = 1/2 * C * U^2 = 1/2 * 1,0\ F * 3,0^2\ V^2 = 4,5\ J$.

Bei der Spannung von 1,5 V, bei der die Leuchtdiode zu Leuchten aufhört, ist der Kondensator noch nicht entladen.
Er hat also noch Energie gespeichert, diese ist:
$W_2 = 1/2 * C * U^2 = 1/2 * 1,0\ F * 1,5^2\ V^2 = 1,125\ J$.

Die Differenzenergie ?W = $W_1 - W_2$ wurde an die Leuchtdiode abgegeben, das sind 3,375 J.
Damit ergibt sich für die Leuchtdauer der Diode: ?t = ?W / P = 3,375 J / 0,02 W = 168,75 s , d.h. etwa 2,8 min.

Auf dem Landesbildungsserver wird zu diesem Thema ein Experiment besprochen, das allerdings mit einem Glühlämpchen statt mit einer Leuchtdiode durchgeführt wird:

Vergleiche hierzu auch folgende Seite auf dem Landesbildungsserver.

IIc.)

Zustandekommen der Spannung

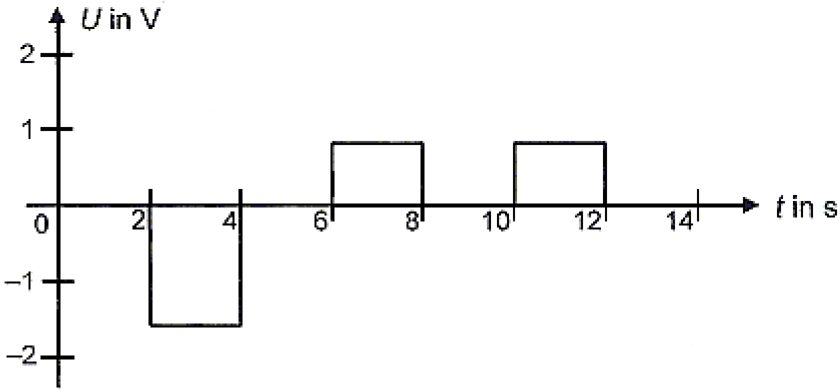
Zunächst bewegt sich die Spule auf das Magnetfeld zu. Nach einer gewissen Zeit taucht die Spule in das Magnetfeld ein.
Die vom Magnetfeld senkrecht durchsetzte Fläche verändert sich dabei, der magnetische Fluss verändert sich daher auch. Solange die Spule nicht ganz im Magnetfeld ist, sich die vom Magnetfeld durchsetzte Fläche also ändert, tritt diese Spannung auf.

Vergleiche hierzu auch folgende Seite auf dem Landesbildungsserver.

(Alternativ ist auch eine Erklärung über die Leiterbewegung und die Lorentzkraft möglich)

Vergleiche hierzu auch folgende Seite auf dem Landesbildungsserver.

t-U-Diagramm für die Bewegung der Spule von P nach Q



Erklärung des Diagrammverlaufes und Berechnung der nötigen Größen:

0 s < t < 2 s
Es dauert zwei Sekunden, bis die rechte Spulenseite den linken Rand des Magnetfeldes erreicht. Während dieser Zeit tritt noch keine Induktionsspannung auf.

2 s < t < 4 s
Während dieser zwei Sekunden taucht die Spule ganz in das Feld der Flussdichte B_1 ein (das Rähmchen ist 0,20 m lang und bewegt sich mit 0,10 m/s, die Rähmchenfläche ist 0,04 m^2).
Die Induktionsspannung während dieses Zeitraumes ist:
U_{ind1} = -n * (? A / ? t) * B = - 100 * (0,04 m^2 / 2 s) * 0,8 T = -1,6 V.

4 s < t < 6 s
In dieser Phase ist das Rähmchen ganz im Feld B_1. Die vom Magnetfeld durchsetzte Fläche ändert sich nicht, daher tritt in diesem Zeitintervall auch keine Induktionsspannung auf.

6 s < t < 8 s
Das Rähmchen geht in diesen zwei Sekunden vom Feld B_1 in das Feld B_2 über. Da das Magnetfeld B_2 schwächer ist als B_1, *nimmt der magnetische Fluss in der Spule diesmal ab*. Die Polung ist also umgekehrt wie zwischen 2 s und 4 s.

Für diesen Abschnitt gilt:
U_{ind2} = -n * A *(? B / ?t) = - 100 * 0,04 m^2 * (-0,4 T / 2 s) = 0,8 V.

8s < t < 10 s
In diesem Zeitraum ist die Spule ganz im Feld B_2 und es gibt keine Induktionsspannung.

10 s < t < 12 s
Nun verlässt die Spule das Feld B_2. Der magnetische Fluss nimmt noch einmal ab. Es gilt:
U_{ind3} = -n * (? A / ? t) * B = - 100 * (0,04 m^2 / 2 s) * -0,4 T = 0,8 V.

14 s < t < 16 s
Die Spule hat den Feldbereich verlassen, es gibt keine Induktionsspannung mehr.

(Eine an der t-Achse gespiegelte Kurve ist ebenfalls richtig.)

Vergleiche hierzu auch folgende Seite auf dem Landesbildungsserver.

Erzeugung einer Spannung

Wenn sich eine Spule vollständig im Feld befindet, dann kann eine Induktionsspannung nur durch Drehen der Spule oder durch Veränderung der magnetischen Flussdichte erzeugt werden. Beim Drehen hat die Induktionsspannung einen sinusförmigen Verlauf und keinen konstanten Wert. Daher kommt hier nur eine Magnetfeldänderung in Frage
(Induktion 2. Art)

Wegen U_{ind} = -n * A *(?B / ?t) = - 100 * 0,04 m^2 * (?B / ?t) = 1,6 V muss die Änderung der magnetischen Flussdichte ?B / ?t = -0,4 T / s sein.

IId.)

Brauchbarkeit der Diagramme

Das Gewichtsstück fällt und übt dabei über die Umlenkrolle eine konstante Kraft auf den Leiterstab aus. Es tritt eine Induktionsspannung auf, da sich der Leiterstab ja bewegt. Von Reibung wird abgesehen und durch das hochohmige Spannungsmessgerät findet praktisch kein Stromfluss statt.

Für die Induktionsspannung gilt: U_{ind} = B * d * v (n ist hier 1).

Durch die *konstante* Kraft wirkt auf den Leiterstab eine *konstante* Beschleunigung, d.h. die Geschwindigkeit v und damit die Induktionsspannung U_{ind} muss *linear anwachsen*.

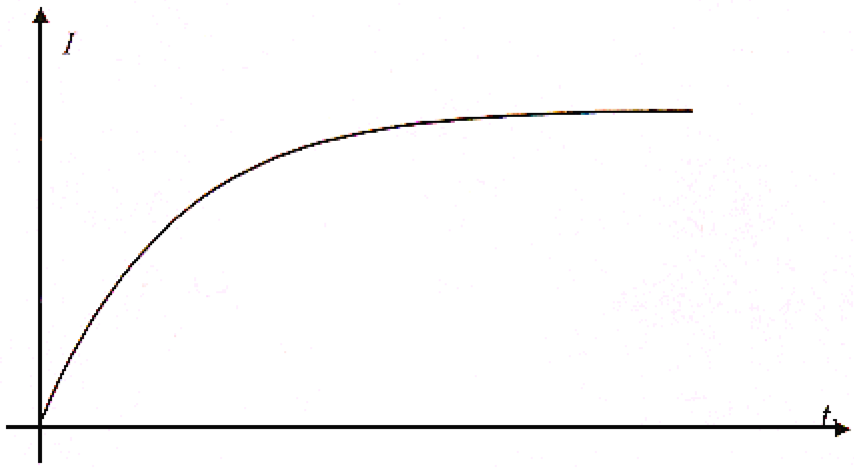
Diagramm 1 scheidet daher aus, da hier die Spannung quadratisch mit der Zeit zunimmt.
Diagramm 3 scheidet aus, weil hier U konstant ist.

Es bleiben noch Diagramm 2 und Diagramm 4.

Beide Diagramme haben einen linearen Spannungsverlauf und beschreiben daher den Vorgang richtig.

Vielleicht könnte man sich dennoch gegen Diagramm 4 entscheiden, weil hier zum Zeitpunkt t = 0 s schon eine Spannung auftritt, also die Stange schon eine Geschwindigkeit hat. Es steht aber nirgends, dass die Stange zum Zeitpunkt t = 0 s aus der Ruhe startet. Sie könnte sich also zu diesem Zeitpunkt auch schon bewegen.
Unbewusst geht man wahrscheinlich trotzdem davon aus, dass die Stange auch bei t = 0 s aus der Ruhe startet, wie es üblich ist, dann müsste man sich für Diagramm 2 entscheiden. Da der letzte Punkt der Aufgabe d auch mit einer Betrachtung aus der Ruhe beginnt, liegt diese Annahme besonders nahe, sie ist aber nicht zwingend.

Skizzierung des t-I-Diagrammes



Erklärung:

Wenn statt des hochohmigen Spannungsmessgerätes nun ein niederohmiges Stromstärkemessinstrument verwendet wird, ergibt sich diesmal ein *Stromfluss* im Stromkreis aus Spule und Messgerät.
Damit wird die Spule zum stromdurchflossenen Leiter und erfährt eine zweite Lorentzkraft entgegen der Bewegungsrichtung, sie wirkt der Beschleunigung entgegen.

Während des ganzen Vorgangs übt das Gewichtsstück eine beschleunigende Kraft auf den Leiterstab aus. Ohne Stromfluss wäre die Beschleunigung (nach rechts) also die ganze Zeit konstant. Nun nimmt aber die Geschwindigkeit der Stange immer mehr zu, damit vergrößert sich auch die Induktionsspannung.
Die Stromstärke im Stromkreis wächst damit aber auch immer mehr an und die bremsende Kraft nach links wird ebenfalls immer größer.

Irgendwann wird diese Kraft so groß, dass sie der beschleunigenden Kraft des Gewichtsstücks das Kräftegleichgewicht hält.
Ab diesem Augenblick wird der Leiterstab nicht mehr schneller - er hat seine Höchstgeschwindigkeit erreicht. Dann nimmt auch die Induktionsspannung und die Stromstärke nicht mehr zu.

Zum besseren Verständnis: physikalisch ähnliche Vorgänge (nicht Bestandteil der Prüfungsaufgabe)

Ein physikalisches Analogon zu dem Vorgang wäre der *Anfahrvorgang (nach rechts) eines Autos*: Zunächst bewirkt die (als konstant betrachtete) Kraft des Motors eine große Beschleunigung des Fahrzeugs. Diese Kraft entspricht der Kraft des Gewichtsstücks. Je schneller das Fahrzeug aber wird, desto mehr bremst es der Luftwiderstand. Dieser entspricht der (Lorentz-)Gegenkraft des stromdurchflossenen Leiters. Schließlich ist die Luftwiderstandskraft so groß wie die Kraft des Motors. Das Fahrzeug kann nicht weiter beschleunigen, es hat seine Höchstgeschwindigkeit erreicht.

Auch der Freie Fall in Luft wäre ein gleichwertiger Vorgang.

Vergleiche hierzu auch folgende Seite auf dem Landesbildungsserver.

Ein ähnlicher Vorgang ist auch die *Selbstinduktion beim Einschalten einer Spule*. Hierbei ergibt sich durch das Zusammenwirken der Spannungen ein ähnlicher t-I-Verlauf. Die Spannung der äußeren Quelle entspräche dabei der Kraft des Gewichtsstücks, die auftretende Selbstinduktionsspannung der (Lorentz-)Gegenkraft.

Das zeitliche Aufladen eines Kondensators ist ein weiterer Vorgang, der nach ähnlichem Schema abläuft.

Diese Prinzip des Zusammen- und Gegeneinanderwirkes zweier Größen ist also sehr verbreitet.

IIIa.)

Zuordnung und Begründung

Abbildung 3 gehört zum Vierfachspalt, zwischen den Hauptmaxima sind Nebenmaxima zu erkennen, dies ist typisch für Mehrfachspalte. Die Zahl der Nebenmaxima ist dabei Zahl der Spalte minus zwei, auch dies passt zu einem Vierfachspalt, denn es sind zwei Nebenmaxima zu sehen.

Bei der *Abbildung 1* sind auch noch Nebenmaxima zu sehen, allerdings sind sie sehr schwach ausgeprägt, dies spricht für eine Interferenz aus sehr vielen Spalten. Die Hauptmaxima sind sehr scharf und lokal begrenzt. *Beides ist typisch für ein Gitter*.

Abbildung 2 muss dann zum Einzelspalt gehören. Dafür spricht auch, dass das Maximum 0.Ordnung sehr breit ist. Weiterhin nimmt die Intensität der Nebenmaxima (in der Abbildung sind die ersten Nebenmaxima zu sehen) relativ schnell ab. Auch dies ist typisch für einen Einzelspalt. Bei Mehrfachspalten und beim Gitter ist dies nicht so.

Bestimmung der Einzelspaltbreite, des Mittenabstandes und der Gitterkonstante

In allen Fällen ist die Wellenlänge des verwendeten Lichts ? = 633 nm, der Schirmabstand a ist 8,0 m.

Einzelspalt:
Aus Abbildung 2 liest man ab, dass die **Minima** des Einzelspaltes jeweils d = 5 cm (0,05 m) von der Mitte liegen.
Weil der Schirmabstand mit 8,0 m riesig gegenüber diesem Abstand sind, sind die Winkel sehr klein und man kann mit der Näherung rechnen.
Es gilt:
sin a = 1 * ? / b = d / a. Daraus folgt für die Breite b des Einzelspaltes b = (a * ?) / d und es ergibt sich b = 1 * 10^{-4} m.

Vierfachspalt und Gitter:
Die Maxima erster Ordnung liegen sowohl beim Vierfachspalt als auch beim Gitter ebenfalls 5 cm von der Mitte entfernt. Also sind die Spaltabstände von Vierfachspalt und Gitter gleich. Auch hier ist die Näherung noch möglich.
Für das **Maximum** erster Ordnung ergibt sich:
sin a = 1 * ? / g = d / a. Daraus folgt für den Spaltmittenabstand (bzw. die Gitterkonstante) g = (a * ?) / d und es ergibt sich ebenfalls g = 1 * 10^{-4} m.

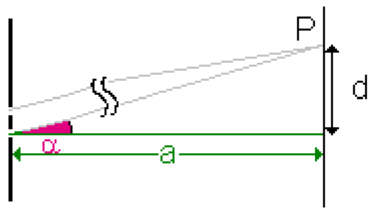
IIIb.)

Herleitung der Gleichungen

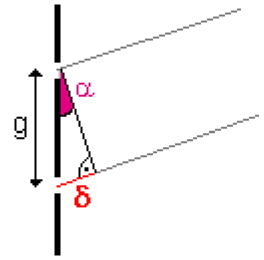
Die Herleitung der Maxima beim Doppelspalt ist eine Standardaufgabe, die immer wieder in der Abiturprüfung vorkommt.

Von jedem der beiden Einzelspalte gehen Elementarwellen aus, die miteinander interferieren. Bis zu einem Punkt P auf dem Schirm haben sie in der Regel unterschiedlich lange Wegstrecken zurückgelegt. Ist diese Wegstreckendifferenz d (man nennt sie auch den Gangunterschied) gerade ein ganzzahliges Vielfaches der Wellenlänge ?, so interferieren die beiden Wellen konstruktiv - es ergibt sich ein Maximum der Helligkeit.

Ist der Schirm sehr weit entfernt im Vergleich zum Abstand der beiden Spalte, so verlaufen die Wellen praktisch fast parallel und treffen erst in großer Entfernung auf dem Schirm im Punkt P zusammen.
Zwischen dem Winkel a, dem Schirmabstand a und der Entfernung des Maximums d von der Mitte gilt:
tan a = d / a (1)



Betrachtet man die Verhältnisse sehr nahe am Spalt, so ergibt sich folgender Zusammenhang zwischen dem Winkel a, dem Abstand der Spalte g und dem Gangunterschied d:
sin a = d / g (2)



Sind die Winkel klein, so kann man sin a = tan a setzen und erhält die bekannte Beziehung für ein Maximum erster Ordnung.
(Die Gangdifferenz d für ein Maximum 1. Ordnung ist 1 * ?):
d / a = d / g = ? / g oder nach d aufgelöst :
d = (? * a) / g

Abstand der Maxima 1. Ordnung

Setzt man die Zahlenwerte ein, so erhält man für d = 2,53 cm. Dies ist der Abstand eines Maximums erster Ordnung von der Mitte. Der Abstand der beiden Maxima 1. Ordnung hat dann den doppelten Wert also etwa 5,06 cm.

Rechnet man nicht mit der Näherungsgleichung sondern der Beziehung (2) von oben, so stellt man fest, dass der Winkel etwa 1,8° beträgt. Die Näherung sin a = tan a ist also problemlos möglich.

Ausfall der Maxima dritter Ordnung:

In den Spalten entsteht nicht nur jeweils eine Elementarwelle sondern viele Elementarwellen. Dadurch muss man die Interferenzbilder des Einzelspaltes und des Doppelspaltes überlagern.
Dabei kann es vorkommen, dass ein Minimum der Einzelspaltinterferenz (hier das erste Minimum) gerade unter dem gleichen Beugungswinkel a auftritt wie ein Maximum der Doppelspaltinterferenz (hier das dritte Maximum).
In einem solchen Fall ist dieses Doppelspalt-Maximum nicht zu beobachten.

Ausfall weiterer Maxima:

Im vorliegenden Fall beobachtet man dasselbe auch für die Maxima 6. Ordnung (sie fallen in das zweite Einzelspalt-Minimum) der 9. Ordnung (sie fallen in das dritte Einzelspalt-Minimum) usw. Jedes dritte Doppelspalt-Maximum fällt aus.

Es gilt:

Einzelspalt Minimum	Doppelspalt Maximum
sin a = (n * ?) / b	sin a = (k * ?) / g

Durch Gleichsetzen erhält man die Beziehung n / b = k / g oder auch n / k = b / g.
Das erste mal fällt das dritte Doppelspalt-Maximum aus (k = 3) weil das erste Einzelspalt-Minimum (n = 1) auch dorthin fällt.
Also folgt: 1 / 3 = b / g oder b = 1/3 g.

Die Ordnungen fallen also deshalb aus, weil die Breite eines Spaltes gerade 1/3 des Abstandes der Spaltmitten ist.

IIIc.)

Für die de-Broglie-Wellenlänge gilt: ? = h / p = h / (m * v). Mit den gegebenen Werten ergibt sich eine de-Broglie-Wellenlänge von ? = $7{,}27 \cdot 10^{-9}$ m.

Eignung der Apparatur:

Die Wellenlänge, die man den Elektronen zuordnen kann, ist erheblich kleiner als die des roten Laserlichtes. Wegen d = (k *? * a) / g bedeutet dies, dass die Maxima sehr eng beieinander liegen und unter Umständen sogar überlappen, d.h. die Minima sind vielleicht gar nicht deutlich zu sehen.

Verbesserung der Anordnung:

Man kann die Geschwindigkeit der Elektronen verändern. Ist sie kleiner, so wird die de-Broglie-Wellenlänge größer und es ist vielleicht wieder eine ordentliche Interferenz zu beobachten.

Man könnte auch den Schirmabstand a vergrößern, um die Maxima weiter auseinander zu bringen, dabei wird allerdings die Intensität kleiner.

Eine letzte Möglichkeit besteht darin, einen anderen Doppelspalt zu verwenden, bei dem die Spalte enger beieinander liegen.
Interferenzen sind ganz allgemein dann optimal zu beobachten, wenn der Spaltabstand g in etwa in der Größenordnung der Wellenlänge ? liegt.

Einzelelektronen:

Beobachtet man nur kurz, so stellt man fest, dass das betreffende Elektron jeweils an einer anderen Stelle auftrifft. Der nächste Auftreffort kann nicht vorhergesagt werden. Jedoch sind bestimmte Auftrefforte wahrscheinlicher als andere. Addiert man jedoch die "Treffer" an jedem Ort auf, so bildet sich im Laufe der Zeit das Interferenzmuster heraus.

Quantenphysikalische Sichtweise

Anders als in der klassischen Physik kann man den Auftreffort nicht aus bekannten Größen wie Ort und Impuls voraussagen (Heisenbergsche Unschärferelation). Da im Experiment von oben jeweils nur ein Elektron in der Anordnung ist, kann man das Interferenzmuster auch nicht als Wechselwirkung verschiedener Elektronen miteinander erklären. Jedes Elektron muss also schon die Information darüber haben, welche Auftrefforte wahrscheinlich und welche unwahrscheinlich sind - es interferiert sozusagen mit sich selbst.

IIId.)

Zahl der emittierten Photonen

Die mittlere Energie *eines* Photons ist W_{ph} = h * f = h * c / ? also $3,97*10^{-19}$ J.

Während des Blitzens werden viele Elektronen emittiert. Die gesamte, vom Blitz abgegebene Energie ist W_{ges} = P * ? t = 10 J.

Daraus folgt die Zahl der Photonen als n = W_{ges} / W_{ph} = $2,5*10^{19}$.

Erläuterung zu den drei Experimenten.

Der Blitz strahlt nicht unbedingt lauter gleiche Photonen ab. Es emittiert weißes Licht, dieses ist bekanntlich eine Mischung aus verschiedenen Lichtfarben und damit von Photonen ganz unterschiedlicher Wellenlängen.
Wird kein Filter benutzt, so gelangen *alle* diese Photonen zum Experiment - energiearme (kleines f) und energiereiche (großes f).
Wird ein Rotfilter benutzt, so gelangen nur noch (energiearme) Photonen des roten Lichts zum Experiment, bei Verwendung eines Blaufilters nur (energiereiche) Photonen des blauen Lichts.
Nur die Versuche A (ohne Filter) und C (Blaufilter) funktionieren, weil hier Photonen ankommen, die energiereich genug sind um den Prozess auszulösen. Wird ein Rotfilter verwendet (Versuch B), sind die Photonen nicht energiereich genug - der Versuch misslingt.

Grenzen der klassischen Wellentheorie

Die klassischen Wellentheorie geht davon aus, dass zwei Lampen doppelte Lichtintensität, also auch doppelte Energiemenge liefern, was dazu führen müsste, dass Versuch B nun vielleicht doch noch gelingt.
Es klappt aber dennoch nicht.
Die Energie liegt nämlich nicht kontinuierlich, sondern gequantelt vor - in "Portionen" von W = h * f .
Bei doppelter Lichtintensität werden zwar doppelt so viele Photonen ausgesandt, dies ändert aber nichts an der Energie *des einzelnen Photons*. Diese hängt nur von der Frequenz (Wellenlänge) des Lichts ab.
Es kommen nun zwar mehr Photonen an, aber die Energie der einzelnen Photonen genügt dennoch nicht um den Prozess auszulösen. Daher ist auch dieser Versuch zum Scheitern verurteilt.