

Martin Apolin

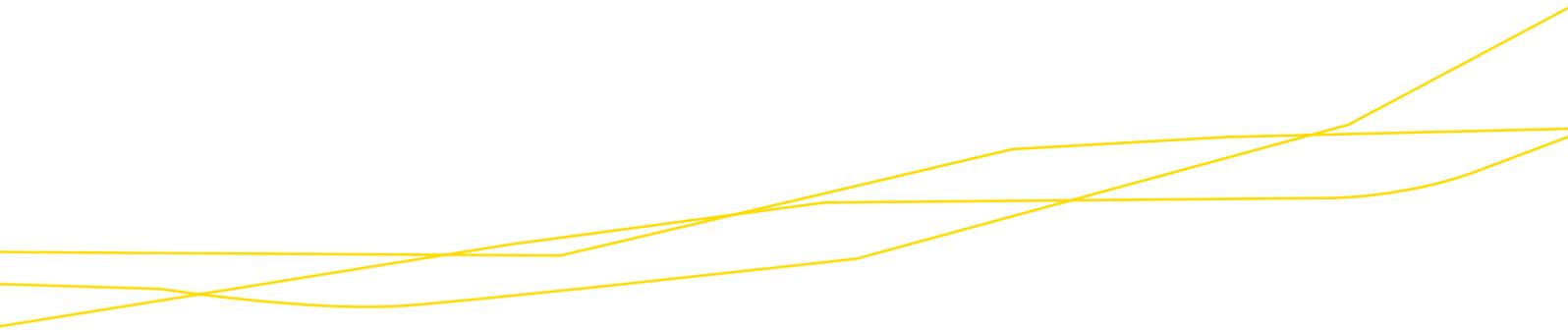
Big Bang

Physik Oberstufe

Klausur- und Abiturtraining

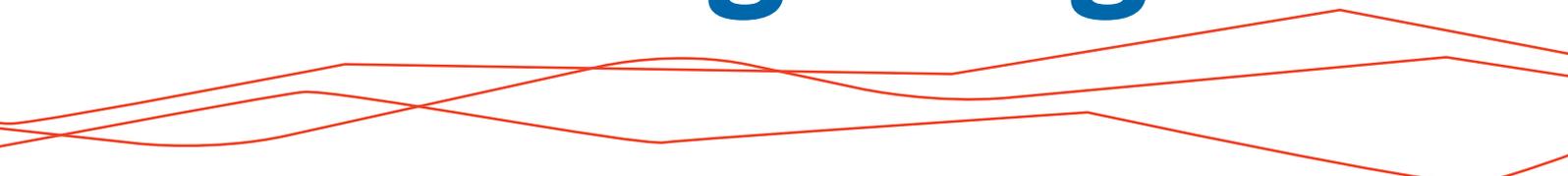


Klett



Martin Apolin

Big Bang



Physik Oberstufe

Klausur- und Abiturtraining

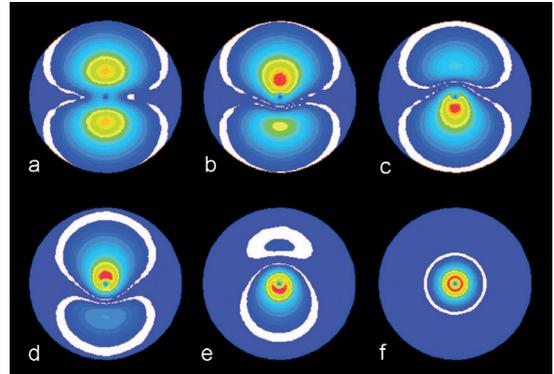
Martin Apolin
Florian Karsten
Matthias Theis

32 Licht als Träger von Energie

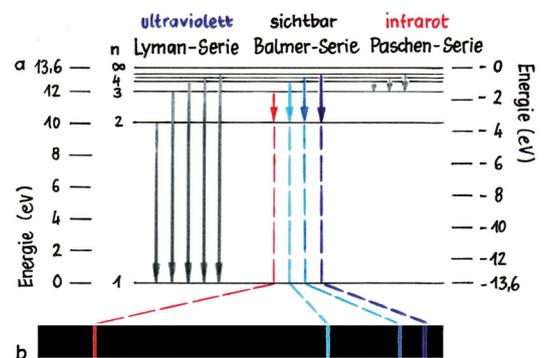
A Verständnisaufgaben

F76 Quanten und Spektren

a) Was versteht man unter einem Quantensprung? Warum ist dieser Ausdruck in mehrfacher Hinsicht verwirrend? Erläutere mit Hilfe der Abbildung.



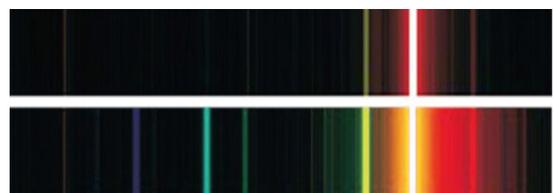
b) Ein Linienspektrum ist eine Art „Fingerabdruck“ eines Elements!
Erkläre diese Aussage und verwende dabei die Abbildung.



c) Ein großer und heißer Stern leuchtet blau und hat eine typische Oberflächentemperatur von etwa 10 000 K. Eine blaue Reklameleuchte hat natürlich nicht diese Temperatur. Warum ist das aber so?
Worin liegt der Unterschied in den beiden Spektren?
Verwende für deine Erklärung die Tabelle.

| | relativer Druck | Dichte [kg/m ³] |
|---------------|------------------|-----------------------------|
| Erdatmosphäre | 1 | 1 |
| Sonneninneres | 10 ¹¹ | 10 ⁵ |
| Eisen | - | 10 ⁴ |

d) In der Abb. siehst du oben das Spektrum einer Nieder- und unten das einer Hochdruck-Natriumdampf Lampe.
Was ist der Unterschied und wie kommt er zustande? Welcher Zusammenhang besteht zu Frage b)?

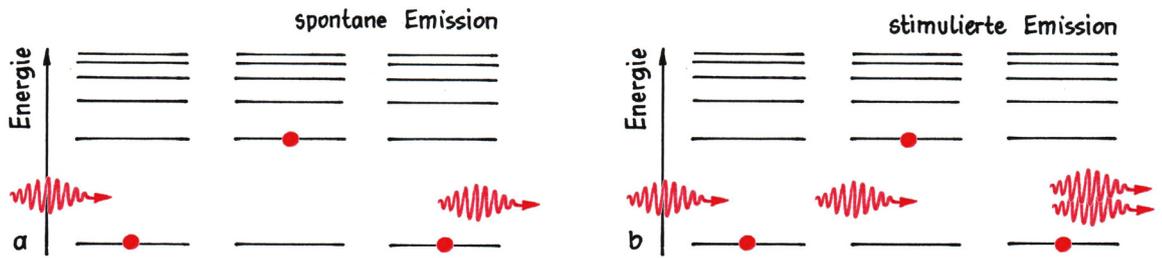


e) Schätze möglichst einfach ab, wie viele Photonen eine 100-W-Glühlampe pro Sekunde aussendet. Verwende dazu die Gleichung $E = h \cdot f$ und die Tabelle ($h = 6,6 \cdot 10^{-34}$ Js).

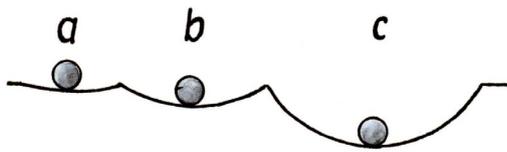
| | relative Photonenenergie | Wellenlänge in 10 ⁻⁷ m | Frequenz 10 ¹⁴ Hz |
|------|--------------------------|-----------------------------------|------------------------------|
| rot | 1-1,2 | 6,5-7,5 | 4,0-4,6 |
| grün | 1,3-1,5 | 4,9-5,8 | 5,2-6,1 |
| blau | 1,5-1,8 | 4,2-4,9 | 6,1-7,1 |
| UV-A | 1,9-2,3 | 3,2-4,0 | 7,5-9,38 |
| UV-B | 2,3-2,7 | 2,8-3,2 | 9,38-10,7 |

F77 Laser

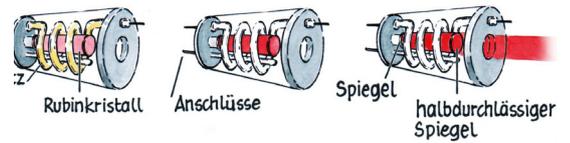
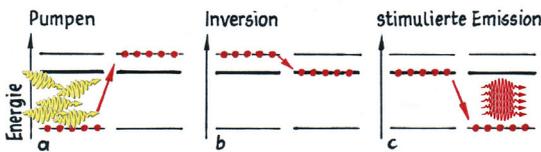
a) Die Abkürzung Laser steht für „Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation“. Was bedeutet das? Verwende für deine Erklärung die Abbildung.



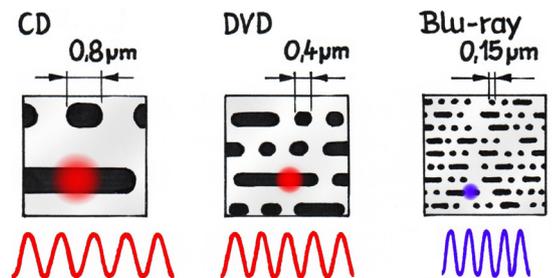
b) Wie könnte man die Lagen der Kugeln in a und b in der linken Abbildung im Vergleich mit c bezeichnen? Welcher Zusammenhang besteht zu den drei Streichholzschafteln in der Abbildung rechts unten? Welcher Zusammenhang besteht zum Laser?



c) Erkläre mit Hilfe der Abbildung die Funktionsweise eines Rubinlasers. Beziehe auch die Antworten auf a und b ein!



d) Warum hat man sich jahrelang bemüht, einen blauen Halbleiterlaser zu bauen? Was kann dieser, was ein roter nicht kann? Verwende für deine Erklärung die Abbildung!



e) Schätze ab, wie viele „Löcher“ pro Sekunde beim Brennen in eine DVD gemacht werden? Gehe dabei von einer Schreibgeschwindigkeit von 5 000 Kilobyte pro Sekunde aus.

B

Trainingsaufgaben

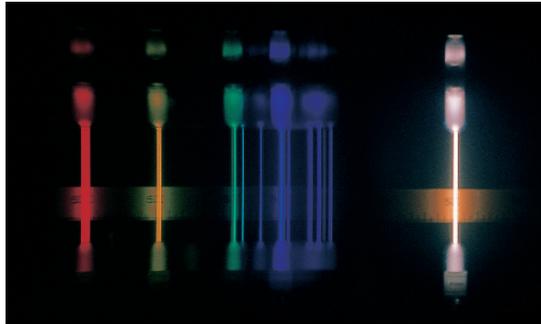
F78 Bohr'sches Atommodell



Niels Bohr

Hinweise: Hier sind die Bilder als Hilfe gedacht. Vielleicht empfinden Sie das nicht so und sind in der Lage, die Bohr'sche Theorie zunächst unabhängig zu entwickeln. Dann können Sie die Einordnung auch danach vornehmen.

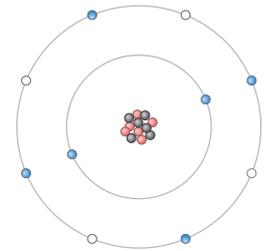
Die Abbildungen weisen auf wichtige Stationen auf dem Weg zur Bohr'schen Theorie von der Emission des Lichtes hin.



B1

$$f = f_{\text{Ry}} \cdot \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

B2



B3

a) Ordnen Sie die Bilder ein und stellen Sie die wesentlichen Schritte zur Entwicklung der Bohr'schen Theorie dar.

b) Man findet heute gelegentlich die Aussage, dass die Bohr'sche Theorie falsch sei. Beurteilen Sie diese Aussage.

F79 Gebundene Elektronen

In einem Farbstoffmolekül kann man sich ein Elektron in einem linearen Potenzialtopf der Länge L mit unendlich hohen Potenzialwänden eingeschlossen denken.

a) Begründen Sie, dass in diesem Modell Elektronen nur bestimmte Energieniveaus E_n besetzen können.

Leiten Sie die Formel $E_n = \frac{h^2 \cdot n^2}{8 \cdot m \cdot L^2}$, $n = 1, 2, 3 \dots$ zur Berechnung dieser Niveaus her.

b) Berechnen Sie die Länge eines solchen Topfes für den Fall, dass beim Übergang aus dem ersten angeregten Zustand in den Grundzustand ein Photon im Bereich des sichtbaren Lichtes ausgesandt wird.

c) Die Frequenzen des von Wasserstoff emittierten Lichtes können aus der empirisch gefundenen Formel $f = f_{\text{Ry}} \cdot \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)$ ($m, n = 1, 2, \dots m < n$) berechnet werden.

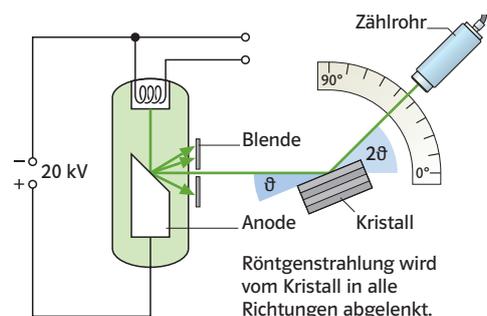
Beurteilen Sie die Brauchbarkeit des für Farbstoffmoleküle verwendeten Modells für die Beschreibung der Lichtemission beim Wasserstoff.

F80 Das Röntgenspektrum

In einer Röntgenröhre treffen Elektronen, die bei einer Spannung U_B beschleunigt wurden, auf eine Anode aus Metall (B1). Es wird Röntgenstrahlung ausgesandt.

a) Erklären Sie die Entstehung der Röntgenstrahlung.

In der Anordnung nach B1 trifft die Röntgenstrahlung auf einen NaCl-Kristall und dringt dann in ein Zählrohr ein. Ab einem bestimmten Winkel ϑ_{grenz} misst man eine erhöhte Zählrate.



B1

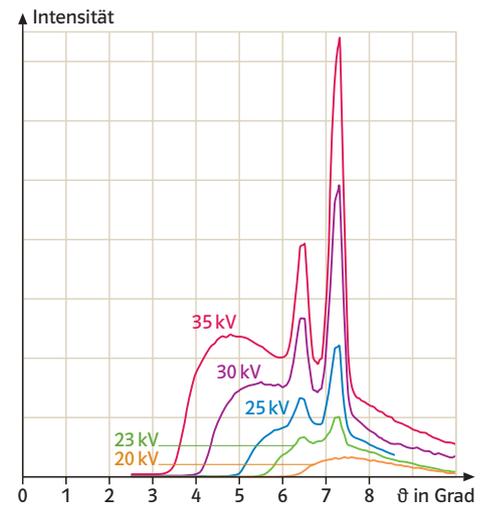
Der Winkel ϑ_{grenz} hängt von der Beschleunigungsspannung U_B ab. B2 zeigt Messergebnisse für verschiedene Spannungen U_B .

Zwischen dem Grenzwinkel, dem Netzebenenabstand a des Kristalls und der Wellenlänge der Röntgenstrahlung besteht die Bragg'sche Beziehung $2 \cdot a \cdot \sin \vartheta_{\text{grenz}} = k \cdot \lambda$ mit $k = 1$.

b) Bestimmen Sie aus der Grafik B2 und der Braggbeziehung für $a = 278 \text{ pm}$ die zu ϑ_{grenz} gehörende Wellenlänge λ_{grenz} und Frequenz f_{grenz} .

c) Begründen Sie die Existenz einer Grenzfrequenz und ihre Abhängigkeit von der Beschleunigungsspannung U_B .

d) Ermitteln Sie aus den vorliegenden Daten die Planck'sche Konstante h .



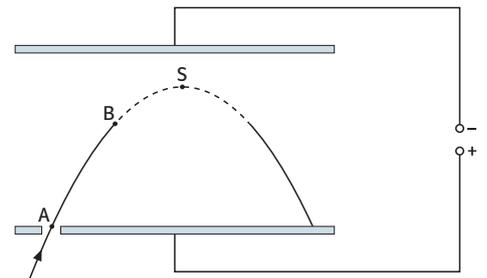
B2

F81 Anregung und Emission

Ein Elektronenstrahl kann sichtbar gemacht werden, indem man ihn durch ein verdünntes Gas schickt.

a) Stellen Sie den Vorgang der Lichtemission für diesen Fall auf der Grundlage eines geeigneten Modells dar.

b) Der in nebenstehender Grafik dargestellte Kondensator befindet sich in einem geeigneten Gas. Man lenkt einen Elektronenstrahl wie skizziert in das homogene elektrische Feld zwischen den Platten, sodass sich die Elektronen auf einer Parabel bewegen. Zwischen A und B beobachtet man verschiedene Farben, im Bereich des Parabelscheitels S ist der Strahl nicht sichtbar. Erklären Sie die Beobachtung. Nennen Sie eine mögliche Farbanordnung im Bereich zwischen A und B.



F82 Rutherford'scher Streuversuch

Rutherford beschoss eine sehr dünne Goldfolie mit α -Teilchen und registrierte die Anzahl der gestreuten Teilchen in Abhängigkeit vom Streuwinkel.

a) Stellen Sie die Bedeutung der Rutherford'schen Streuversuche für die Entwicklung von Vorstellungen über das Atom dar.

b) Der Rutherford'sche Versuch kann mit einem Computer simuliert werden. Erläutern Sie die nachfolgenden Programmzeilen. Nennen Sie die Größen, für die beim Start des Programms Anfangswerte bekannt sein müssen.

F83 Untersuchungen an Elektronenröhren

1 Abbildung B1 zeigt den Aufbau einer Elektronenröhre. Aus einer Glühkathode werden durch Glühemission Elektronen freigesetzt. Diese werden dann im elektrischen Feld zwischen der Kathode und der Anode beschleunigt.

Die Spannung U_A wird über ein regelbares Netzgerät eingestellt, ein Amperemeter misst den Strom I_A der Elektronen, die an der Anode ankommen.

Das U_A - I_A -Diagramm einer Elektronenröhre wird als Kennlinie bezeichnet. Den Verlauf der Kennlinie zeigt Abbildung B2.

- a) Erklären Sie den Verlauf der Kennlinie.
 b) Im Bereich, der in der Kennlinie mit A bezeichnet ist, kann die Spannung als Gegenspannung aufgefasst werden. In der Tabelle sind ihre Beträge und die zugehörigen Stromstärken angegeben.

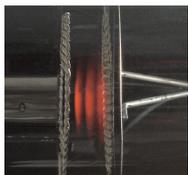
| | | | | | |
|-------------|------|------|------|------|------|
| U_A in V | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| I_A in mA | 0,63 | 0,45 | 0,33 | 0,24 | 0,18 |

Zeigen Sie, dass die Stromstärke in diesem Bereich mit zunehmenden Spannungsbeträgen exponentiell abklingt. Leiten Sie eine Gleichung zur Beschreibung des Vorganges her.

c) Unter Halbwertspannung versteht man das Spannungsintervall, innerhalb dessen sich die Stromstärke halbiert.

Bestimmen Sie die Halbwertspannung für den Abklingvorgang aus Aufgabenteil b).

Schätzen Sie die kinetische Energie der Elektronen nach Verlassen der Glühkathode ab.

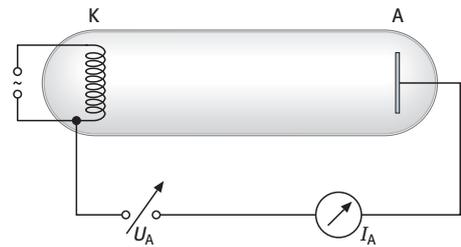


B4

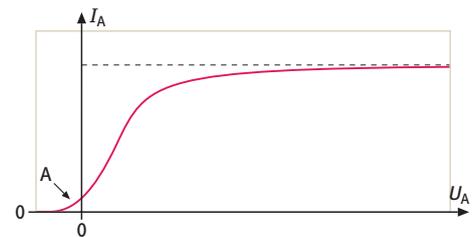
2 In der Anordnung nach Abbildung B3 ist die Röhre mit Neongas gefüllt. Bei zunehmender Spannung U_A zeigen sich zunächst nahe der Anode A, dann zunehmend im Raum zwischen Anode und Kathode Leuchterscheinungen (B4).

a) Erklären sie die Emission von Licht in diesem Experiment.

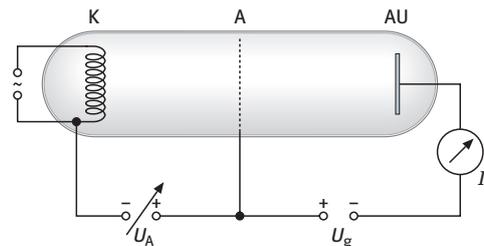
Deuten Sie die Entwicklung der Schichtstruktur mithilfe des Energiestufenmodell des Atoms.



B1



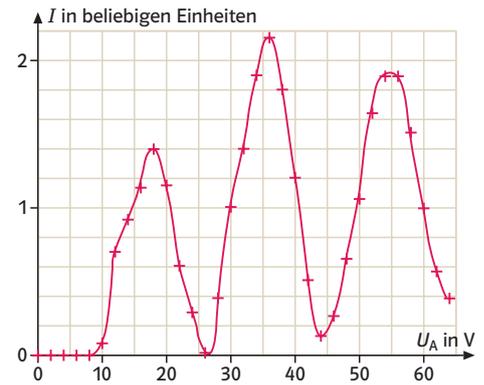
B2



B3

b) Erhöht man die Spannung U_A von 0V bis 65V bei fest eingestellter Gegenspannung U_g , dann erhält man den in Abbildung B5 gezeigten Verlauf der Stromstärke in Abhängigkeit von U_A : Begründen Sie, dass der Strom erst bei einer gewissen Spannung U_A einsetzt. Erläutern Sie den gesamten Kurvenverlauf. Stellen Sie den Zusammenhang zwischen der Messkurve und der beobachteten Schichtstruktur dar.

c) Die Wellenlänge des von der mit Neon gefüllten Röhre emittierten Lichtes ist etwa $\lambda = 650\text{ nm}$. Entwickeln sie hieraus und aus der Messkurve Aussagen über Energiestufen eines Neonatoms.



B5 U_A - I_A -Diagramm

3 Die Wellenlänge von Natriumlicht soll mit Hilfe eines Gitters bestimmt werden. Beschreiben Sie eine Versuchsanordnung. Geben Sie die zu messenden Größen und eventuell erforderliche Formeln an.

D Hilfen

H79 Bohr'sches Atommodell

Hier sind die Bilder als Hilfe gedacht. Vielleicht empfinden Sie das nicht so und sind in der Lage, die Bohr'sche Theorie zunächst unabhängig zu entwickeln. Dann können Sie die Einordnung auch danach vornehmen. Zur Beurteilung bedenken Sie, dass sich Bohr in erster Linie mit dem Wasserstoffatom befasste.

H80 Gebundene Elektronen

Im Potenzialtopf mit unendlich hohen Wänden ist der Aufenthaltsbereich der Elektronen eingeschränkt. Erinnern Sie sich, was dies für Wellen bedeutet?
Zur Energie gelangen Sie dann über die Schlusskette Wellenlänge \Rightarrow Impuls \Rightarrow Energie

H81 Das Röntgenspektrum

Beachten Sie: $E_{\text{Elektron}} \Rightarrow E_{\text{Röntgenphoton}}$

Die Erinnerung an die h -Bestimmung mittels des Photoeffektes kann hilfreich sein. Bei Bestimmung einer Konstanten aus mehreren Messwerten ist eine Fehlerbetrachtung angezeigt.

H82 Anregung und Emission

Beachten Sie, dass Licht eine Form von Energie ist und dass bei der Wechselwirkung von Elektronen mit Gasmolekülen die kinetische Energie der Elektronen z.T. oder ganz auf die Gasmoleküle übertragen werden kann. Die Farbe des vom Gas emittierten Lichts hängt vom Energiebetrag ab, der bei dieser Wechselwirkung übertragen wird.

H83 Rutherford'scher Streuversuch

Sie brauchen zur Bearbeitung dieser Aufgabe keine Computerkenntnisse. Die Anweisungen in Teilaufgabe b) können im Prinzip auch mit Papier und Bleistift bearbeitet werden. Dann dauert es für viele Schritte nur sehr lange. Beziehen Sie die Programmzeilen auf die Zeichnung. Schreiben Sie Definitionsgleichungen für Geschwindigkeit und Beschleunigung auf.

L76 Quanten und Spektren

a) Erstens bezeichnet man im Alltag mit einem Quantensprung etwas sehr Großes und Bedeutsames, während in der Quantenmechanik damit etwas extrem Winziges bezeichnet wird. Zweitens „springt“ ein Quant nicht, sondern es schwingt von Energieniveau zu Energieniveau, wie in der Abbildung dargestellt ist.

b) Ein Elektron in einem isolierten Atom kann nicht beliebige Mengen Energie aufnehmen und wieder abgeben, sondern nur ganz bestimmte. Photonen transportieren jene Energie, die beim „Sprung“ eines Elektrons auf ein tieferes Energieniveau frei wird. Darum leuchten Gase nur in ganz bestimmten Farben. Das Linienspektrum ist somit eine Art „Fingerabdruck“ eines Elements, weil es von den möglichen Energieniveaus der Elektronenorbitale abhängt. Bei Wasserstoff ist nur die Balmer-Serie sichtbar.

c) + d) Dünne Gase (etwa bei Normaldruck) erzeugen Linienspektren (Frage a). Wird der Druck erhöht, dann beeinflussen einander die einzelnen Atome und somit auch die Energieniveaus in den Orbitalen. Dadurch werden andere Energieniveaus als in einem isolierten Atom möglich – die Linien beginnen auseinander zu fließen (Abb. unten). Unter extrem hohem Druck, wie er zum Beispiel in Sternen herrscht, sind die Linien so verbreitert, dass ein kontinuierliches Spektrum entsteht. Im Sonneninneren ist z.B. der Druck 10^{10} -mal größer als der Luftdruck der Erdatmosphäre. Das Innere der Sonne wirkt daher wie ein Festkörper, und Festkörper besitzen immer kontinuierliche Spektren.

e) Um die ausgesendeten Photonen pro Sekunde zu berechnen, nehmen wir vereinfacht an, dass alle Photonen im mittleren Frequenzbereich um $5,5 \cdot 10^{14}$ Hz liegen. Ein einzelnes Photon hat daher die Energie $E = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ J s} \cdot 5,5 \cdot 10^{14} \text{ s}^{-1} = 3,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$. Es gilt $1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}$. Eine Glühbirne mit 100 W strahlt daher pro Sekunde 100 J ab. $100 \text{ J} / (3,6 \cdot 10^{-19} \text{ J pro Photon}) \approx 3 \cdot 10^{20}$ Photonen.

L77 Laser

a) Übersetzt bedeutet Laser so viel wie „Lichtverstärkung durch stimulierte Emission von Strahlung“. Beim Laser wird nämlich die stimulierte Emission verwendet. Diese tritt auf, wenn auf ein bereits angeregtes Elektron nochmals ein gleiches Photon trifft (Abb. b).

b) Die Kugeln in der Abbildung sind alle im stabilen Gleichgewicht. Aber es ist offensichtlich, dass die rechte Kugel am stabilsten ruht, weil am meisten Energie notwendig ist, um sie herauszubekommen. a und b nennt man daher zwischen- oder metastabil. Ähnlich ist es mit der Streichholzschachtel. Die linke und mittlere Position sind zur rechten metastabil. Metastabilität spielt auch beim Laser eine große Rolle.

c) Durch einen Lichtblitz werden die Elektronen des Rubins auf ein höheres, „normales“ Energieniveau gehoben (a; pumpen) und fallen dann auf das metastabile Niveau zurück (b). Die Energie wird dabei nicht in Form von Strahlung frei, sondern mechanisch an das Kristallgitter abgegeben. Weil sich jetzt mehr Elektronen im angeregten Zustand befinden als im Grundzustand, spricht man von einer Inversion. Irgendein Elektron fällt spontan als erstes vom metastabilen Niveau und löst bei allen anderen Elektronen eine stimulierte Emission aus (c).

d) Die kleinsten Strukturen liegen bereits bei einer DVD um $0,4 \mu\text{m}$ (= 400 nm). Bei einer Blu-ray sind die Strukturen noch kleiner. Das Licht eines roten Lasers hat eine zu große Wellenlänge, um diese Strukturen auszulesen. Der blaue Laser wurde also entwickelt, um die Datendichte auf optischen Speichermedien erhöhen zu können.

e) 5000 kB/s entsprechen $5 \cdot 10^6$ B/s. Ein Byte besteht wiederum aus 8 Bit, also aus 8 Nullen und Einsern. Es müssen also pro Sekunde 40 Millionen Bit geschrieben werden. Wenn man vereinfacht annimmt, dass Nuller und Einser im gleichen Verhältnis vorkommen und nur die Einser gebrannt werden müssen, dann kommt man auf 20 Millionen Brennvorgänge pro Sekunde.

L78 Bohr'sches Atommodell

a) B1 zeigt das diskrete Spektrum eines leuchtenden Gases, wie man es z. B. durch ein optisches Gitter erhält. Ende des 19. Jahrhunderts war bekannt, dass Gase in charakteristischen Farben leuchten (Na z. B. gelb) und dass die spektrale Zerlegung dieses Lichtes auf diskrete Linienspektren führt. Balmer gelang es 1894, für das Spektrum des Wasserstoffs die in B2 angegebene Formel zur Berechnung dieser Spektrallinien aus einer Konstanten und natürlichen Zahlen anzugeben.

Nachfolger von Balmer versuchten, weitere Spektralserien zu entdecken. All diesen Bemühungen war gemeinsam, dass es darum ging, aus den gemessenen Daten rechnerische Zusammenhänge zu finden. Es gab keine theoretische Vorstellung, wie Atome gebaut sein müssten, um in der Lage zu sein, Licht in diskreten Frequenzen auszusenden. Thomson hatte ein „Rosinenkuchenmodell“ vorgeschlagen; es gelang jedoch nicht, quantitative Aussagen zur Verteilung der Elektronen in dem Atom zu machen. Rutherford gelang dann der Nachweis, dass das Atom einen sehr kleinen Kern hat. Die damit verbundene Idee, dass die Elektronen den Kern umkreisen (B3), konnte aber nicht richtig sein, denn auf der Kreisbahn werden die Elektronen beständig beschleunigt und müssen demnach Energie abstrahlen. Dieses Gebilde kann also nicht stabil sein. Bohr hatte die Idee, den Elektronen nur bestimmte Bahnen zuzuweisen, auf denen sie sich dann strahlungslos bewegen sollten. Energieabgabe bzw. -aufnahme sollte nur beim Übergang von einer Bahn auf eine andere möglich sein.

Für die Radien der strahlungsfreien Bahnen gab Bohr eine Regel an, die mit den vorliegenden physikalischen Kenntnissen nicht zu begründen war. Zusammen mit bekannten Zusammenhängen über Kreisbewegungen und Energien in einem elektrischen Radialfeld führte sie aber zur bekannten Balmerformel und zum Bohr'schen Atommodell. Für das Wasserstoffatom liefert die Theorie gute Übereinstimmung mit den Messungen.

b) Wenn man die Übereinstimmung der Theorie mit dem Experiment zum Maßstab nimmt, kann man die Bohr'sche Theorie für das Wasserstoffatom nicht falsch nennen. Ich würde aber eine Theorie nie richtig nennen, sondern brauchbar. So hat sich schon bald gezeigt, dass die Bohr'schen Vorstellungen für kompliziertere Atome erheblich modifiziert werden mussten. Wir wissen heute, dass die Vorstellung von Planetenbahnen der Elektronen um den Kern nicht richtig sein kann, denn in atomaren Dimensionen kann nicht mehr von einer definierten Bahn gesprochen werden. Wir wissen, dass das Elektron einen Spin hat, der allerdings im Fall des Wasserstoffs zufällig nicht relevant ist. Die Bohr'sche Theorie ist aber für das, wofür sie entwickelt wurde, nämlich quantitative Aussagen zu Emission von Licht durch Wasserstoffatome zu machen, brauchbar.

L79 Gebundene Elektronen

a) Die Elektronen im Atom sind Quantenobjekte, die durch die Zustandsfunktion ψ beschrieben werden. Die ψ -Funktion hat keine konkrete physikalische Bedeutung, sie beschreibt das stochastische Verhalten der Elektronen. Sie hat die mathematische Struktur einer Wellengleichung. Deswegen sind Überlegungen analog zu denen bei Wellen möglich. Das Elektron kann den Potenzialtopf mit unendlich hohen Wänden nicht verlassen. Deswegen ist die Aufenthaltswahrscheinlichkeit außerhalb des Potenzialtopfes gleich null. Innerhalb des Bereiches der Länge L bildet $\psi(x)$ stehende Wellen aus. Wegen des Anschlusses an den Außenraum müssen die Werte an den Rändern null sein, entsprechend den Knoten einer stehenden Welle am festen Ende. In diesem Fall sind nur Wellen mit den Wellenlängen $\lambda_n = \frac{2L}{n}$ mit $n = 1, 2, \dots$ möglich.

Dies führt zu Impulsen $p_n = \frac{h}{\lambda_n} = \frac{h \cdot n}{2L}$ und zu den möglichen Energiewerten $E_n = \frac{p_n^2}{2m_e} = \frac{h^2 \cdot n^2}{8m_e \cdot L^2}$.

b) Die Energie des Photons ist gegeben durch $\Delta E = h \cdot f = \frac{h^2}{8m_e \cdot L^2} \cdot (n_2^2 - n_1^2)$.

Das Photon ist mit dem Übergang aus dem ersten angeregten Zustand, also $n_2 = 2$, in den Grund-

zustand, $n_1 = 1$ verbunden. Nach L aufgelöst erhält man $L = \sqrt{\frac{3h \cdot \lambda}{8m_e \cdot c}}$.

Als Wellenlänge des sichtbaren Lichtes wähle ich einen mittleren Wert, z. B. $\lambda = 550 \text{ nm}$ und erhalte $L = 7,1 \cdot 10^{-10} \text{ m}$.

Formelsammlung:

$$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$$

$$c = 2,998 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$m_e = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$$

c) Aus der angegebenen Formel erhalte ich durch Multiplikation mit h eine Energieformel

$\Delta E = h \cdot f = h \cdot f_{\text{Ry}} \cdot \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2}\right)$, d.h., auch diese Formel gründet sich auf die Vorstellung, Lichtemission erfolge dadurch, dass Elektronen zwischen diskreten Energiezuständen wechseln, wie es die Modellvorstellung des in Teilaufgabe a) betrachteten Potenzialtopfes liefert. Die Formel in Teilaufgabe b) und die gegebene Formel kennzeichnen die verschiedenen Energieniveaus durch natürliche Zahlen. Die Abhängigkeit von diesen Zahlen ist aber in beiden Formeln sehr unterschiedlich, was sich z. B. auf die Struktur der Spektren auswirkt. Beim linearen Potenzialtopf nimmt die Energiedifferenz für benachbarte Energieniveaus bei großen Zahlen zu, bei der gegebenen Formel geht sie gegen null. Der lineare Potenzialtopf liefert also die Grundidee, die zu den diskreten Energieniveaus führt, für Wasserstoff liefert sie aber nicht die richtigen Zahlenwerte.

L80 Das Röntgenspektrum

a) Die Röntgenstrahlung entsteht bei der starken Abbremsung der Elektronen im Anodenmaterial. Diese Strahlung nennt man Bremsstrahlung, sie besitzt ein kontinuierliches Spektrum.

b) Mit $2a \cdot \sin \vartheta_{\text{grenz}} = \lambda$ und $f = \frac{c}{\lambda}$ erhalte ich folgende Werte:

| U_B | ϑ_{grenz} | λ | f |
|-------|----------------------------|-----------|-------------------------|
| 35 kV | 3,5° | 33,9 pm | $8,84 \cdot 10^{18}$ Hz |
| 30 kV | 4,0° | 38,8 pm | $7,73 \cdot 10^{18}$ Hz |
| 25 kV | 5,0° | 48,5 pm | $6,18 \cdot 10^{18}$ Hz |
| 23 kV | 5,5° | 53,3 pm | $5,62 \cdot 10^{18}$ Hz |
| 20 kV | 6,5° | 62,9 pm | $4,77 \cdot 10^{18}$ Hz |

c) Bei der Abbremsung wird die kinetische Energie der Elektronen in Energie der Röntgenstrahlung umgewandelt. Bei dieser Umwandlung kann die Energie der Röntgenstrahlung maximal so groß werden wie die kinetische Energie der Elektronen.

Die kinetische Energie, die die Elektronen im elektrischen Feld aufnehmen, kann man nach $E_{\text{Elektron}} = e \cdot U_B$ berechnen. Die Energie der Röntgenstrahlung lässt sich nach $E_{\text{Röntgen}} = h \cdot f$ berechnen. Bei der Grenzfrequenz f_{grenz} wird die ganze kinetische Energie in Energie der Röntgenstrahlung umgesetzt. Es gilt also $e \cdot U_B = h \cdot f_{\text{grenz}}$.

d) Mit der in Teilaufgabe c) angeführten Gleichung lässt sich h berechnen mit $h = \frac{e \cdot U_B}{f_{\text{grenz}}}$.

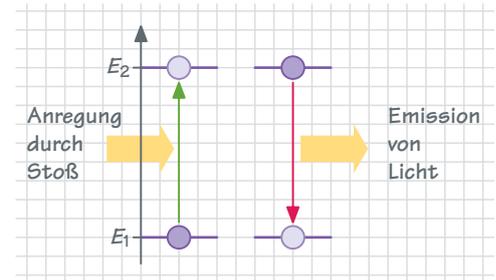
| U_B | f | h |
|-------|-------------------------|--------------------------|
| 35 kV | $8,84 \cdot 10^{18}$ Hz | $6,34 \cdot 10^{-34}$ Js |
| 30 kV | $7,73 \cdot 10^{18}$ Hz | $6,22 \cdot 10^{-34}$ Js |
| 25 kV | $6,18 \cdot 10^{18}$ Hz | $6,48 \cdot 10^{-34}$ Js |
| 23 kV | $5,62 \cdot 10^{18}$ Hz | $6,56 \cdot 10^{-34}$ Js |
| 20 kV | $4,77 \cdot 10^{18}$ Hz | $6,72 \cdot 10^{-34}$ Js |

Als Mittelwert ergibt sich $h = 6,46 \cdot 10^{-34}$ Js, die maximale Abweichung beträgt $\Delta h_{\text{max}} = 0,26 \cdot 10^{-34}$ Js, das entspricht 4% des Mittelwertes.

L81 Anregung und Emission

a) Ich lege das Energiestufenmodell des Atoms zugrunde.

Hiernach befinden sich die Elektronen im Atom auf diskreten Energieniveaus. Im Grundzustand sind die niedrigsten nach den Regeln des Pauliprinzips besetzt. Ein Wechsel zu höheren Niveaus (Anregung) erfordert passende Energiezufuhr, ein Wechsel zu niedrigeren Niveaus ist mit der Emission von Energie in Form von Strahlung verbunden. In diesem Fall wird die Anregungsenergie durch die kinetische Energie der Elektronen beim Stoß mit den Gasatomen bereitgestellt.



b) Die Anregungsenergie muss mindestens so groß sein wie der Energieabstand ΔE zwischen dem obersten besetzten und dem untersten unbesetzten Niveau. Die kinetische Energie nimmt beim Aufstieg von A nach S ab und beim Abstieg wieder zu. Im oberen Bereich der Parabel ist sie kleiner als die Anregungsenergie. Bei fehlender Anregung kann es auch keine Emission geben. Mit der größten kinetischen Energie in der Nähe von A können Elektronen auf höhere Niveaus springen. Bei der Rückkehr in den Grundzustand wird dann gemäß $\Delta E = h \cdot f$ Licht höherer Frequenz emittiert, Entsprechendes gilt für den Abstieg.

Licht im Bereich um A wird eher zu Blau (energiereicher) tendieren, im Bereich von B zu Rot (energieärmer).

L82 Rutherford'scher Streuversuch

a) Die Rutherford'schen Streuversuche führen zu der Vorstellung, ein Atom bestehe aus einem positiv geladenen Kern und einer negativen Hülle aus Elektronen. Der Atomdurchmesser wird durch die Hülle bestimmt, der Kerndurchmesser ist deutlich kleiner als der Atomdurchmesser. Das Atom ist also i.W. leer.

- b) 1. Nach dem Satz des Pythagoras wird aus den momentanen Koordinaten des Aufenthaltsortes des Alphateilchens der Abstand R vom Kern berechnet.
2. Nach dem Coulomb'schen Gesetz wird die Kraft auf das Alphateilchen berechnet.
3. Die Kraft wird in eine x -Komponente und eine y -Komponente zerlegt. Diese werden mithilfe ähnlicher Dreiecke berechnet.
4. Nach dem Grundgesetz der Mechanik ($F = m \cdot a$) werden die Beschleunigungen in x - und y -Richtung berechnet.
5. Mit den erhaltenen Beschleunigungen werden aus alten Geschwindigkeitskomponenten neue berechnet.
6. Mit den Geschwindigkeitskomponenten werden aus alten Koordinaten neue berechnet.
7. Die Zeit wird um einen Zeitschritt erhöht.

Anfangswerte sind erforderlich für die Geschwindigkeitskomponenten und die Koordinaten.

c) In die Simulation geht die Hypothese ein, ein Atom bestehe aus einem positiv geladenen Kern, der die Bahn des Alphateilchens bestimmt.

Die Gesetze, die eine solche Bahn bestimmen, sind – unabhängig von der Hypothese – bekannt. Man kann dann die experimentell gewonnenen Daten mit den aus der Simulation gewonnenen vergleichen. Eine Übereinstimmung stützt die Hypothese. Man kann versuchen, andere Annahmen zu formulieren, mithilfe von Zusammenhängen, die man für gesichert hält, simulieren und erneut vergleichen. Da es sich bei einer Simulation um ein mathematisches Verfahren handelt, muss man bei der Beurteilung immer mögliche mathematische Einflüsse auf das Ergebnis beachten.

d) Die Gleichungen lassen sich umschreiben z.B. zu $a_x = \frac{v_{x, \text{neu}} - v_{x, \text{alt}}}{\Delta t}$ bzw. $v_x = \frac{x_{\text{neu}} - x_{\text{alt}}}{\Delta t}$

Das sind aber die Definitionsgleichungen für Geschwindigkeit und Beschleunigung, sofern beide in der Zeitspanne Δt konstant sind. Die Grundidee der Iteration ist, eine beliebige Bewegung durch abschnittsweise gleichförmige Bewegungen zu ersetzen.

L83 Untersuchungen an Elektronenröhren

1a) Die Kennlinie kann in drei Bereiche eingeteilt werden:

- A: Hier gibt es einen Strom trotz Gegenspannung.
- B: Hier wächst die Stromstärke mit der Spannung.
- C: Hier bleibt die Stromstärke trotz zunehmender Spannung konstant.



Es kann überhaupt ein Strom entstehen, weil durch Glühemission im Raum zwischen A und K Elektronen als bewegliche Ladungsträger zur Verfügung stehen. Wenn Elektronen aus der Kathode austreten, bleibt diese positiv geladen zurück und zieht damit die Elektronen an. Um die Kathode bildet sich eine Elektronenwolke. In ihr herrscht zwischen den aus K austretenden und wieder eintretenden Elektronen ein dynamisches Gleichgewicht.

- A: Elektronen haben beim Austritt aus K wegen der Temperatur eine gewisse kinetische Energie, aber nicht alle die gleiche. Einige können ohne äußere Spannung die Anode erreichen. Bei zunehmender Gegenspannung werden das weniger, weil immer weniger Elektronen die notwendige Energie haben.
- B: Zwischen der Anode A und dem äußeren Rand der Elektronenwolke bildet sich ein elektrisches Feld, in dem Elektronen in Richtung Anode beschleunigt werden. Dadurch wird die Elektronenwolke vom Rand her abgebaut. Mit zunehmender Spannung werden immer mehr Elektronen erfasst. Die Stromstärke steigt.
- C: Alle pro Zeiteinheit aus K austretenden Elektronen werden sofort vom Feld erfasst. Spannungserhöhung bringt keine Erhöhung der Stromstärke, weil nicht mehr Ladungsträger zur Verfügung stehen.

b) Die I_A -Werte gehören zu äquidistanten U_A -Werten. Bei einem exponentiellen Zusammenhang muss dann der Quotient benachbarter I_A -Werte konstant sein.

| | | | | | | |
|-------------|------|------|------|------|------|------|
| U_A in V | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| I_A in mA | 0,90 | 0,63 | 0,45 | 0,33 | 0,24 | 0,18 |
| Quotient | | 1,43 | 1,40 | 1,36 | 1,38 | 1,33 |

Hinweis:
Eine Bearbeitung mit dem GTR findet sich auf Seite 13.

Der Mittelwert des Quotienten ist 1,38. Der Mittelwert der Abweichungen vom Mittelwert ist $0,03 = 2\%$ bezogen auf den Mittelwert. Ich betrachte damit den exponentiellen Zusammenhang als bestätigt.

Herleitung der Gleichung:

Exponentielles Ansteigen lässt sich durch eine Gleichung der Form $I(U) = a \cdot e^{-b \cdot U}$ beschreiben.

Die Konstanten a und b lassen sich aus den Messwerten ermitteln:

Wertepaar (0V | 0,90 mA): $0,90 \text{ mA} = a \cdot 1$ mit $e^0 = 1$ liefert $a = 0,9 \text{ mA}$

Wertepaar (1V | 0,63 mA): $0,63 \text{ mA} = 0,90 \text{ mA} \cdot e^{-b} \Leftrightarrow \ln \frac{0,63}{0,9} = -b \Leftrightarrow b = 0,36$

Damit lautet die Gleichung $I_A(U_A) = 0,90 \text{ mA} \cdot e^{(-0,36V^{-1}) \cdot U_A}$

c) Die Halbwertsspannung $U_{1/2}$ ist gekennzeichnet durch die Gleichung $I(U + U_{1/2}) = \frac{1}{2} I(U)$.

Bestimmung der Halbwertsspannung durch Betrachtung der Messwerte:

In der Messtabelle erkennt man, dass die Stromstärke in den gleichfarbig markierten Feldern jeweils etwa halbiert wird. Die zugehörige Spannung ändert sich jeweils um 2V. Die Halbwertsspannung beträgt danach $U_{1/2} = 2V$.

| | | | | | | |
|-------------|------|------|------|------|------|------|
| U_A in V | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| I_A in mA | 0,90 | 0,63 | 0,45 | 0,33 | 0,24 | 0,18 |

Bestimmung der Halbwertsspannung durch Berechnung:

Mit der zuletzt formulierten Gleichung für $I(U_A)$ gilt

$$I(U_A) = 0,90 \text{ mA} \cdot e^{(-0,36 \text{ V}^{-1}) \cdot U_A} = 2 \cdot 0,90 \text{ mA} \cdot e^{(-0,36 \text{ V}^{-1}) \cdot (U_A + U_{1/2})}$$

$$\Leftrightarrow 2 = e^{(-0,36 \text{ V}^{-1}) \cdot U_{1/2}} \Leftrightarrow \ln 2 = -0,36 \text{ V}^{-1} \cdot U_{1/2}$$

Dies führt auf $U_{1/2} = 1,9 \text{ V}$.

Abschätzung der Energie

Wie in Aufgabenteil a) ausgeführt, erreichen einige Elektronen die Anode noch bei der Gegenspannung 5 V . Diese haben dann mindestens die Energie $5 \text{ eV} = 5 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 8 \cdot 10^{-19} \text{ J}$.

Die meisten Elektronen haben eine Energie von weniger als $8 \cdot 10^{-19} \text{ J}$.

Bearbeitung von 1b) und 2c) mit dem GTR

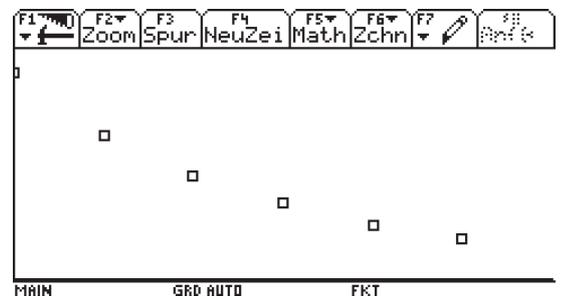
Hinweis: Die Bilder vom GTR-Display sind hier zur Illustration eingefügt. Das ist bei der Bearbeitung der Klausur nicht möglich. Eine Skizze der Punktwolke ist aber zu empfehlen.

b) Ich gebe die Daten in den Grafikrechner ein (das kann je Rechnertyp unterschiedliche Befehle erfordern). Auf der x -Achse trage ich die Spannung U_A in V, auf der y -Achse die Stromstärke I_A in mA auf und erzeuge so aus den Messwerten eine Punktwolke.

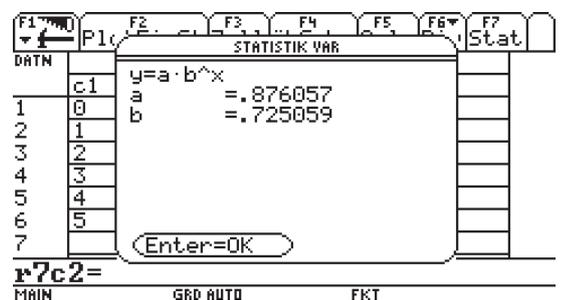
| | F1 Plot | F2 EinSt | F3 Zell | F4 Übschr | F5 Calc | F6 Div | F7 Stat |
|------|---------|----------|---------|-----------|---------|--------|---------|
| DATA | c1 | c2 | c3 | c4 | c5 | | |
| 1 | 0 | .9 | | | | | |
| 2 | 1 | .63 | | | | | |
| 3 | 2 | .45 | | | | | |
| 4 | 3 | .33 | | | | | |
| 5 | 4 | .24 | | | | | |
| 6 | 5 | .18 | | | | | |
| 7 | | | | | | | |

r7c2=

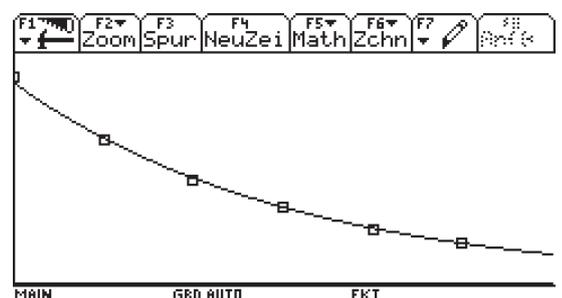
MAIN GRD AUTO FKT



Weil es für $U_A = 0 \text{ V}$ einen Wert für I_A gibt und weil die Kurvenform dafür spricht, wähle ich eine Exponentialkurve mit der Gleichung $y = a \cdot b^x$ als Regressionsfunktion. Ich erhalte $a = 0,876$ und $b = 0,725$, die Gleichung lautet damit $y = 0,876 \cdot 0,725^x$.



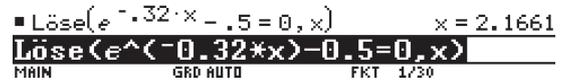
Ich lasse den Graphen der gefundenen Funktion zeichnen. Er passt gut zu der Punktwolke.



Mit der Beziehung $b^x = e^{x \cdot \ln b}$ schreibe ich die Gleichung mit der üblichen Basis e , runde und erhalte $y = 0,90 \cdot e^{-0,32 \cdot x}$.

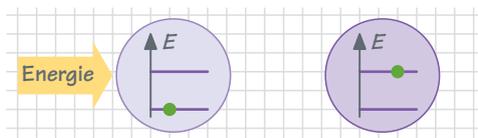
Ich schreibe die Gleichung mit physikalischen Größen. Sie lautet $I_A = 0,90 \text{ mA} \cdot e^{-0,32 \cdot \text{V}^{-1} \cdot U_A}$.

b) Ich suche den Spannungswert, bei dem sich ausgehend von $U_A = 0V$ die Stromstärke halbiert hat. Ich gebe die Gleichung $e^{-0,32 \cdot x} = 0,5$ bzw. $e^{-0,32 \cdot x} - 0,5 = 0$ in den Gleichungslöser ein und erhalte $U_{1/2} = 2,2V$.

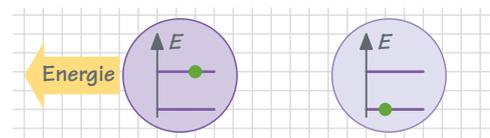


2a) Die Emission von Licht kann grundsätzlich im Energiestufenmodell des Atoms, hier des Neonatoms, beschrieben werden. Atome befinden sich in ganz bestimmten, für sie typischen Energiezuständen. Durch Zufuhr von Energie kann ein Zustand mit höherer Energie angenommen werden. Das Atom wird angeregt, die Energie absorbiert (B1).

Bei Rückkehr in den Ausgangszustand wird Energie, z.B. in Form von Licht, emittiert.



B1 Absorption und Anregung



B2 Emission und Rückkehr in den Ausgangszustand

In diesem Fall erfolgt die Anregung durch Stoß von Elektronen gegen Atome. Anregung ist erst möglich, wenn beim Stoß die Energie entsprechend der Differenz zwischen zwei Niveaus zur Verfügung steht.

Elektronen erreichen die notwendige Energie, wenn sie eine bestimmte Strecke im elektrischen Feld durchlaufen haben. Bei niedriger Feldstärke ist diese Strecke lang, bei höherer Feldstärke wird sie kürzer. Deswegen erreichen Elektronen zunächst diese Energie gar nicht, dann bei höherer Feldstärke unmittelbar vor der Anode, sodass dort Atome zum Leuchten angeregt werden. Bei weiter zunehmender Feldstärke wandert diese Anregungszone auf die Kathode zu. Nach dem Stoß haben die Elektronen ihre Energie verloren, werden aber im Feld neu beschleunigt. Bei hinreichend hoher Feldstärke bzw. Spannung können sie dann unmittelbar vor der Anode erneut anregen, eine zweite Leuchtschicht entsteht. Dieser Prozess kann fortgesetzt werden, wird allerdings nach oben durch die mögliche Ionisation des Gases begrenzt. In den Dunkelzonen werden also die Elektronen so stark beschleunigt, dass sie in den anschließenden Leuchtzonen Atome anregen können.

b) Die Anode ist gitterförmig, sodass Elektronen hindurch treten können. Wenn sie die Elektrode AU erreichen, besteht ein Strom I . Da im elektrischen Feld zwischen A und AU eine Kraft gegen die Elektronenbewegung wirkt, benötigen die Elektronen eine von der Gegenspannung abhängige Mindestenergie, um AU zu erreichen. Der Strom setzt daher erst ein, wenn diese im Feld zwischen K und A, d.h., bei hoher Beschleunigungsspannung erreicht wird. Wenn das der Fall ist, steigt die Stromstärke wie bei der Kennlinie in Teilaufgabe 1a). Stöße mit Gasatomen wirken sich nicht aus, weil die Elektronenenergie zur Anregung nicht ausreicht und die Masse des Gesamtatoms groß ist im Vergleich zur Elektronenmasse. Bei Annahme eines elastischen Stoßes erfolgt dann praktisch keine Energieübertragung. Erst wenn die Anregungsenergie bei genügend hoher Spannung erreicht ist, geben die Elektronen beim Stoß Energie ab und haben dann nicht mehr ausreichend Energie zur Verfügung, um AU zu erreichen. Dies erklärte die Abnahme der Stromstärke.

Dies geschieht nicht für alle Elektronen auf einmal, weil zum einen wegen der thermischen Auslösung eine gewisse Energieverteilung vorliegt und zum anderen, weil nicht alle Elektronen gegen Gasatome stoßen.

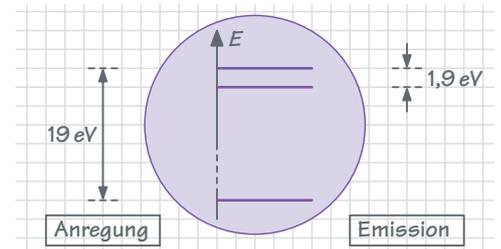
Dem 1. Minimum der Messkurve entspricht also die Ausbildung der 1. Leuchtschicht unmittelbar vor der Anode. Der Anstieg der Stromstärke ergibt sich aus der erneuten Beschleunigung der Elektronen bis zur 2. Anregungsmöglichkeit. Das 2. Minimum entspricht also der 2. Leuchtschicht usw.

c) Strahlung mit $\lambda = 650 \text{ nm}$ erfordert zwei Niveaus mit einer entsprechenden Energiedifferenz

$$\Delta E = h \cdot f = \frac{h \cdot c}{\lambda} = \frac{6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J s} \cdot 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{650 \cdot 10^{-9} \text{ m}} = 3,1 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 1,9 \text{ eV.}$$

In der Messkurve haben benachbarte Minima etwa den Abstand $\Delta U = 19 \text{ V}$. Die Anregungsenergie ist dann entsprechend den Ausführungen in Teilaufgabe 2b) 19 eV . Das entspricht nicht der aus dem emittierten Licht berechneten Energiedifferenz.

Beide Ergebnisse zusammen führen zu folgender Vorstellung. Das Neonatom hat mindestens drei Energieniveaus mit den in **B3** angegebenen Energiedifferenzen.



B3 Neonatom mit drei Energieniveaus

3 Bild **B4** zeigt in Draufsicht eine mögliche Versuchsanordnung. Hinter einem Maßstab befindet sich bei H_0 eine mit Natriumdampf gefüllte Spektralröhre. Sie wird durch das Gitter G mit der Gitterkonstanten g beobachtet. Symmetrisch zu H_0 beobachtet man die Interferenzmaxima H_k k -ter Ordnung. Man wählt ein Maximum, z. B. für $k = 1$ und misst folgende Größen:

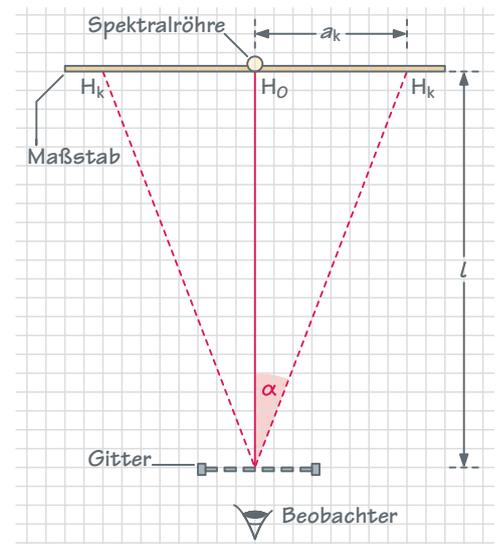
l = Abstand des Gitters vom Maßstab

a_k = Entfernung zwischen H_0 und H_k

Aus $\tan \alpha_k = \frac{a_k}{l}$ $k = 0, 1, 2 \dots$

und $\sin \alpha_k = k \cdot \frac{\lambda}{g}$ $k = 0, 1, 2 \dots$

wird λ berechnet.



B4

Big Bang Physik Oberstufe Klausur- und Abiturtraining

wurde von Martin Apolin, Florian Karsten und Dr. Matthias Theis erstellt.

Bildquelle

U1.1 dreamstime.com (Spanychev), Brentwood, TN; **2.3** Dr. Josef Schreiner, Wien/öbv; **3.7** Dr. Martin Apolin, Wien/öbv; **4.0** Alamy stock photo (Pictorial Press), Abingdon, Oxon; **4.1** Klett-Archiv, Stuttgart; **6.4** LEYBOLD®/LD DIDACTIC GmbH/www.ld-didactic.de, Hürth

Sollte es in einem Einzelfall nicht gelungen sein, den korrekten Rechteinhaber ausfindig zu machen, so werden berechnete Ansprüche selbstverständlich im Rahmen der üblichen Regelungen abgegolten. den korrekten Rechteinhaber ausfindig zu machen, so werden berechnete Ansprüche selbstverständlich im Rahmen der üblichen Regelungen abgegolten.

1. Auflage

1 5 4 3 2 1 | 2024 23 22 21 20

Alle Drucke dieser Auflage sind unverändert und können im Unterricht nebeneinander verwendet werden.

Die letzte Zahl bezeichnet das Jahr des Druckes.

Das Werk und seine Teile sind urheberrechtlich geschützt. Jede Nutzung in anderen als den gesetzlich zugelassenen Fällen bedarf der vorherigen schriftlichen Einwilligung des Verlages. Hinweis § 60 a UrhG: Weder das Werk noch seine Teile dürfen ohne eine solche Einwilligung eingescannt und in ein Netzwerk eingestellt werden. Dies gilt auch für Intranets von Schulen und sonstigen Bildungseinrichtungen. Fotomechanische oder andere Wiedergabeverfahren nur mit Genehmigung des Verlages.

Auf verschiedenen Seiten dieses Bandes befinden sich Verweise (Links) auf Internet-Adressen.

Haftungshinweis: Trotz sorgfältiger inhaltlicher Kontrolle wird die Haftung für die Inhalte der externen Seiten ausgeschlossen. Für den Inhalt dieser externen Seiten sind ausschließlich die Betreiber verantwortlich. Sollten Sie daher auf kostenpflichtige, illegale oder anstößige Inhalte treffen, so bedauern wir dies ausdrücklich und bitten Sie, uns umgehend per E-Mail davon in Kenntnis zu setzen, damit beim Nachdruck der Verweis gelöscht wird.

© Ernst Klett Verlag GmbH, Stuttgart 2020. Alle Rechte vorbehalten. www.klett.de

Das vorliegende Material dient ausschließlich gemäß § 60b UrhG dem Einsatz im Unterricht an Schulen.

Entstanden in Zusammenarbeit mit dem Projektteam des Verlages.

Gestaltung: normaldesign GbR, Maria und Jens-Peter Becker, Schwäbisch Gmünd.

Illustrationen: Janosch A. Slama, Hausbrunn (Österreich); Alfred Marzell, Schwäbisch Gmünd; Andreas Staiger, Stuttgart.

Satz: B2 Büro für Gestaltung, Andreas Staiger, Stuttgart.