

Allgemeine Hinweise zu den Aufgaben:

Zunächst sollte versucht werden, die Aufgaben ausschließlich unter der Verwendung derjenigen Hilfsmittel zu bearbeiten, die auch in Klausuren zugelassen sind, also Formelsammlung und Taschenrechner. Weitere Hilfsmittel (Scripte, Aufzeichnungen, Lehrbuch) sollten erst dann hinzugezogen werden, wenn auch nach längerem Nachdenken kein zielführender Lösungsansatz gefunden werden kann. Der Zeitbedarf pro Aufgabe liegt bei ca. 30 - 90 Minuten.

Der einleitende Text beschreibt einen Sachverhalt und kennzeichnet relevante Größen. Die nachfolgenden Arbeitsaufträge definieren die entsprechende Fragestellung.

Vor einer Lösung der Aufgaben sollte in jedem Fall zunächst der entsprechende Versuchsaufbau skizziert, angemessen beschriftet und verbal der Aufbau und ggf. detaillierter als im einleitenden Text die Durchführung, erwartete Beobachtungen sowie das Versuchsziel beschrieben werden.

Nach der Lösung von Aufgaben, die die Herleitung einer Formel enthalten, sollten geeignete konkrete Werte sinnvoll ausgewählt und eingesetzt werden, um die Größenordnungen abschätzen zu lernen.

Ü-16 (Schnelle Teilchen)

Geladene Teilchen lassen sich durch geeignete elektrische Felder beschleunigen. Die dabei aufgenommene Energie hängt von der durchlaufenen Spannung ab. Zum Erreichen sehr hoher Geschwindigkeiten werden entsprechend lange Linearbeschleuniger oder mit geeigneten magnetischen Feldern zur Ablenkung versehene Beschleunigerringe verwendet.

- a) Bestimmen Sie die zu durchlaufende Beschleunigungsspannung U_b , mit der Elektronen bzw. Protonen auf eine Geschwindigkeit von 99 % der Lichtgeschwindigkeit gebracht werden können.
- b) Berechnen Sie die Flussdichte B , die notwendig ist, um die Teilchen aus a) auf eine Bahn mit einem Krümmungsradius von $r = 1,5 \text{ m}$ abzulenken.

Ü-17 (Zeitdilatation)

Satelliten des GPS-Systems bewegen sich auf ihren erdnahen Umlaufbahnen in einer Höhe von 400 bis 700 km über dem Erdboden mit einer Geschwindigkeit von ca. 28 000 km/h. Der Vergleich der Laufzeit der von ihnen ausgesendeten synchronen Signale wird zur Positionsbestimmung benutzt.

- a) Ein GPS-Empfänger empfängt Signale von 3 Satelliten, die sich in 1200 km, 2700 km und 3200 km Entfernung befinden. Bestimmen Sie die zeitlichen Abstände, mit denen die drei Signale am Empfänger eintreffen.
- b) Die Uhren der Satelliten werden etwa alle 30 Minuten mit einer Uhr auf dem Erdboden synchronisiert. Die Genauigkeit der Positionsbestimmung kann zusätzlich verbessert werden, indem man die Zeitgeber in den Satelliten relativistisch korrigiert. Bestimmen Sie den Fehler, der sich ohne diese Korrektur maximal bei der Positionsbestimmung ergeben würde.

Ü-18 (Quantenobjekte)

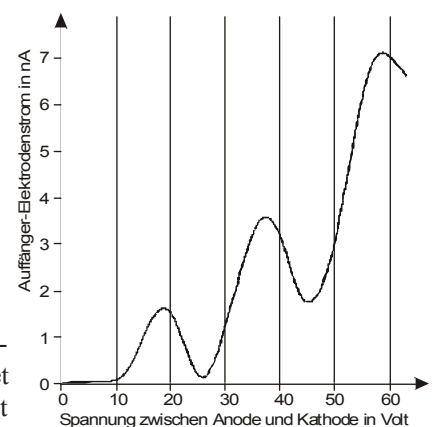
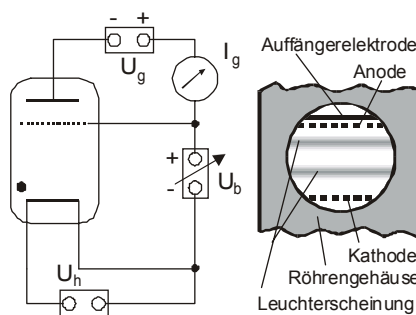
In der Wechselwirkung mit Materie weist Licht Teilcheneigenschaften auf, während z.B. beschleunigte Elektronen bei der Wechselwirkung mit regelmäßigen Strukturen (z.B. Kristallgitter) Welleneigenschaften zeigen. Diese Gemeinsamkeiten führen zur Einführung des übergeordneten Begriffes „Quantenobjekt“, mit dem beide Arten von Objekten erfasst werden.

- a) Bestimmen Sie die Wellenlänge eines Elektrons mit einer kinetischen Energie von 150 keV und vergleichen Sie diese mit der Wellenlänge eines γ -Quants der gleichen Energie.
- b) Erläutern Sie anhand nebenstehender Skizze die Bedeutung der Heisenbergschen Unschärferelation für Quantenobjekte.



Ü-19 (Quantenhafte Emission und Absorption)

Beim Franck-Hertz-Versuch werden in einer Gas-gefüllten Röhre aus einer Kathode austretende Elektronen zu einer als Gitter geformten Anode beschleunigt, eine Auffangelektrode hinter dem Anodengitter, an die eine Gegenspannung von ca. 3 V angelegt ist, erlaubt die Messung der Elektronen, die nach Passieren der Anode noch eine hinreichende Energie besitzen, um die Auffangelektrode zu erreichen (siehe Abbildung oben links). Bei steigender Beschleunigungsspannung U_b zeigen sich mehrere Schichten, bei denen das Gas in der Röhre leuchtet (Abbildung oben rechts). Den Stromverlauf an der Auffangelektrode in Abhängigkeit von der Beschleunigungsspannung für Neon zeigt die Abbildung ganz rechts.



- a) Begründen Sie die Schichtung der Leuchterscheinung in der Röhre zwischen Kathode und Anode.
- b) Deuten Sie den Verlauf des Auffängerstromes in Abhängigkeit von der Beschleunigungsspannung U_b .

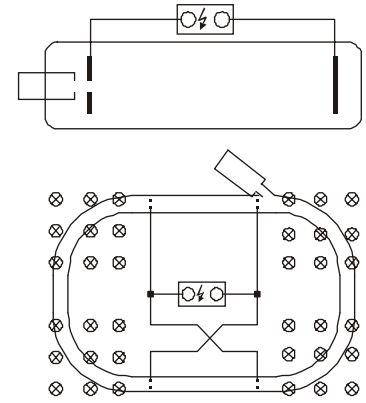
Lsg. Ü-16

Versuchsziel: Beschleunigung geladener Teilchen

Aufbau: Geladene Teilchen werden in das elektrische Feld zwischen zwei geeignet gepolten Elektroden gebracht. Im Beschleunigerring wird außerdem ein magnetisches Feld senkrecht zur Bewegungsrichtung der Teilchen erzeugt, dass die Teilchen auf eine gekrümmte Bahn zwingt.

Skizze: siehe Abbildung rechts (oben: Linearbeschleuniger, unten: Beschleunigerring)

Durchführung: Bei einem Beschleuniger können mehrere Beschleunigungsstrecken hintereinander geschaltet werden, wobei diese entsprechende der zunehmenden Geschwindigkeit der Teilchen entsprechend angesteuert werden müssen. Beim Beschleunigerring muss die magnetische Flussdichte der aktuellen Teilchengeschwindigkeit angepasst werden.



- a) Da die Geschwindigkeit v der Teilchen in der Größenordnung der Lichtgeschwindigkeit c liegt, muss hier relativistisch gerechnet werden. Für die im elektrischen Feld aufgenommene kinetische Energie E_{kin} gilt

$$E_{\text{kin}} = q \cdot U_b \tag{16.1}$$

und für die relativistische Gesamtenergie ergibt sich

$$E_r = E_0 + E_{\text{kin}} \tag{16.2}$$

wobei $E_0 = m_0 \cdot c^2$ die Ruheenergie des Teilchens ist. In E_r ist die relativistische Masse m_r des Teilchens enthalten, diese wiederum ist von der Geschwindigkeit v abhängig. Mit

$$E_r = m_r \cdot c^2 = \frac{m_0 \cdot c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = E_0 \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \tag{16.3}$$

erhält man nach Auflösen von (16.2) nach E_{kin} die Gleichung

$$E_{\text{kin}} = q \cdot U_b = E_r - E_0 \tag{16.4}$$

und somit nach Einsetzen von (16.3) in (16.4) für U_b den Ausdruck

$$U_b = \frac{E_0}{q} \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right) \tag{16.5}$$

Einsetzen der Zahlenwerte für das Elektron ergibt mit $m_{0,e} = 9,109 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ und $q = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

$$U_b = \frac{m_0 \cdot c^2}{q} \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right) = \frac{9,109 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \cdot \left(2,998 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^2}{1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}} \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{(0,99 \cdot c)^2}{c^2}}} - 1 \right) = 3,11 \cdot 10^6 \text{ V}$$

und mit $m_{0,p} = 1,672 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ und $q = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ für das Proton

$$U_b = \frac{m_0 \cdot c^2}{q} \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right) = \frac{1,672 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \cdot \left(2,998 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^2}{1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}} \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{(0,99 \cdot c)^2}{c^2}}} - 1 \right) = 5,71 \cdot 10^9 \text{ V}$$

b) Im magnetischen Feld erfahren mit der Geschwindigkeit v bewegte Ladungen die Lorentzkraft F_L , für die gilt:

$$F_L = q \cdot v \cdot B \quad (16.6)$$

Sie steht im Gleichgewicht zur Zentralkraft F_Z , für die gilt:

$$F_Z = m_r \cdot \frac{v^2}{r} \quad (16.7)$$

wobei hier die relativistische Masse benutzt werden muss. Damit ergibt sich bei gegebenem Krümmungsradius r für die magnetische Flussdichte B der Ausdruck

$$B = \frac{m_r \cdot v}{q \cdot r} \quad (16.8)$$

Einsetzen der relativistischen Masse

$$m_r = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (16.9)$$

ergibt für B den Ausdruck

$$B = \frac{m_0}{q \cdot r} \cdot \frac{v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{m_0}{q \cdot r} \cdot \frac{c}{\sqrt{\left(\frac{c}{v}\right)^2 - 1}} \quad (16.10)$$

Einsetzen der Zahlenwerte ergibt für das Elektron

$$B = \frac{9,109 \cdot 10^{-31} \text{ kg}}{1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 1,5 \text{ m}} \cdot \frac{2,998 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{\sqrt{\left(\frac{1}{0,99}\right)^2 - 1}} = 7,98 \text{ mT}$$

und für das Proton

$$B = \frac{1,672 \cdot 10^{-27} \text{ kg}}{1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 1,5 \text{ m}} \cdot \frac{2,998 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{\sqrt{\left(\frac{1}{0,99}\right)^2 - 1}} = 14,6 \text{ T}$$

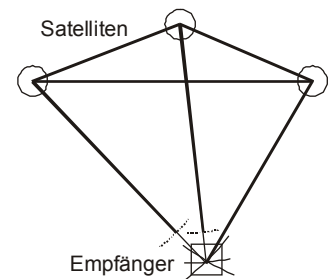
Lsg. Ü-17

Versuchsziel: Signallaufzeit bei bewegten Objekten

Aufbau: Die Satelliten benötigen eine genau gehende Uhr als Zeitgeber, um synchrone Signale auszusenden, die von einem Empfänger je nach Entfernung zu unterschiedlichen Zeiten empfangen werden. Aus der Laufzeitdifferenz kann bei bekannter Position der Satelliten die Position des Empfängers bestimmt werden.

Skizze: siehe Abbildung rechts

Durchführung: Die Position der Satelliten zueinander ist bekannt. Nach Eintreffen des ersten Signals vergeht eine gewisse Zeit, bis das zweite und etwas später das dritte Signal eintrifft. Wenn die Signale gleichzeitig ausgesandt wurden und der Zeitpunkt des Aussendes genau bekannt ist, lässt sich daraus die Position des Empfängers eindeutig berechnen.



a) Die Laufzeit t_i des Signale ergibt sich aus der zu durchlaufenden Strecke s_i und der Lichtgeschwindigkeit c zu

$$t_i = \frac{s_i}{c} \quad (17.1)$$

Für die drei angegebenen Strecken erhält man

$$t_1 = \frac{1,20 \cdot 10^6 \text{ m}}{2,998 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 4,002668 \cdot 10^{-3} \text{ s}$$

$$t_2 = \frac{2,70 \cdot 10^6 \text{ m}}{2,998 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 9,006004 \cdot 10^{-3} \text{ s}$$

$$t_3 = \frac{3,20 \cdot 10^6 \text{ m}}{2,998 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 10,673782 \cdot 10^{-3} \text{ s}$$

Damit ergeben sich für das Eintreffen der anderen beiden Signale die Zeitintervalle

$$\Delta t_{1,2} = 5,003336 \cdot 10^{-3} \text{ s}$$

$$\Delta t_{1,3} = 6,671114 \cdot 10^{-3} \text{ s}$$

Aus diesen Zeitintervallen kann der Empfänger die Wegstreckenunterschiede und damit die relative Position der Satelliten zu seiner eigenen Position bestimmen.

- b) Die Eigenbewegung der Satelliten führt dazu, dass ihre Uhren etwas langsamer gehen als die des Empfängers, was dazu führt, dass das Zeitintervall zwischen der Aussendung zweier Signale länger dauert als für die ruhende Uhr des Empfängers. Der Fehler Δt dieses Zeitintervalls ist als relativer Fehler anzugeben und ergibt sich zu

$$\frac{\Delta t}{t_0} = \frac{t_0 - t_r}{t_0} \quad (17.2)$$

wobei t_0 die Länge des Zeitintervalls im ruhenden und t_r die Länge des entsprechenden Zeitintervalls im bewegten System ist. Für die Zeitdilatation, die der ruhende Beobachter im bewegten System beobachtet, gilt

$$t_r = t_0 \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad (17.3)$$

Eingesetzt in (17.2) erhält man somit für den relativen Fehler

$$\frac{\Delta t}{t_0} = \frac{t_0 - t_0 \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}{t_0} = 1 - \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad (17.4)$$

Einsetzen der Zahlenwerte liefert daraus mit $v = 28\,000 \text{ km/h} = 7,778 \cdot 10^3 \text{ m/s}$

$$\frac{\Delta t}{t_0} = 1 - \sqrt{1 - \frac{(7,778 \cdot 10^3 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2}{(2,998 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2}} = 3,37 \cdot 10^{-10}$$

Nach 30 Minuten = 1 800 s hat sich der Fehler auf

$$\Delta t = 1800 \text{ s} \cdot 3,37 \cdot 10^{-10} = 6,07 \cdot 10^{-7} \text{ s}$$

summiert, daraus ergibt sich ohne relativistische Korrektur eine maximale Ortsungenauigkeit von

$$\Delta s = \Delta t \cdot c = 6,07 \cdot 10^{-7} \text{ s} \cdot 2,998 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 182 \text{ m}$$

Lsg. Ü-18

Versuchsziel: Veränderung der Ausbreitung einer Wellenfront durch ein beugendes System

Aufbau: Beschleunigte Elektronen bzw. γ -Strahlung als Quantenobjekte treffen auf ein beugendes System wie z.B. einen dünnen geladenen Draht (Elektronen) oder ein Kristallgitter (γ -Strahlung).

Skizze: -

Durchführung: Bei konstanter Wellenlänge wird die Ladung des Drahtes verändert bzw. verschiedene Kristallgitter verwendet.

a) Für Elektronen ergibt sich nach deBroglie die Wellenlänge aus dem Impuls p des Elektrons zu

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{m_r \cdot v} \quad (18.1)$$

Da die hier angegebene kinetische Energie in der Größenordnung der Ruheenergie eines Elektrons liegt, muss die relativistische Masse m_r benutzt werden. Aus

$$E_r = E_0 + E_{\text{kin}} \quad (18.2)$$

erhält man

$$m_r \cdot c^2 = m_0 \cdot c^2 + E_{\text{kin}} \quad (18.3)$$

und daraus für m_r den Ausdruck

$$m_r = m_0 + \frac{E_{\text{kin}}}{c^2} \quad (18.4)$$

Nach Einsetzen der Zahlenwerte erhält man mit $E_{\text{kin}} = 150 \text{ keV} = 2,403 \cdot 10^{-14} \text{ J}$ für die relativistische Masse

$$m_r = 9,109 \cdot 10^{-31} \text{ kg} + \frac{2,403 \cdot 10^{-14} \text{ J}}{(2,998 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2} = 11,78 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$$

Die Geschwindigkeit v des Elektrons ergibt sich aus (18.3) nach mehreren Umformungsschritten:

$$\frac{m_0 \cdot c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = m_0 \cdot c^2 + E_{\text{kin}} \quad (18.5)$$

$$\frac{m_0 \cdot c^2}{m_0 \cdot c^2 + E_{\text{kin}}} = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad \Rightarrow \quad \left(\frac{m_0 \cdot c^2}{m_0 \cdot c^2 + E_{\text{kin}}} \right)^2 = 1 - \frac{v^2}{c^2}$$

$$v = c \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{m_0 \cdot c^2}{m_0 \cdot c^2 + E_{\text{kin}}} \right)^2} \quad (18.6)$$

Einsetzen der Zahlenwerte liefert mit der Ruheenergie $m_0 \cdot c^2 = 8,187 \cdot 10^{-14} \text{ J}$

$$v = 2,998 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{8,187 \cdot 10^{-14} \text{ J}}{8,187 \cdot 10^{-14} \text{ J} + 2,403 \cdot 10^{-14} \text{ J}} \right)^2} = 1,90 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Eingesetzt in (18.1) ergibt sich daraus für die Wellenlänge des Elektrons

$$\lambda = \frac{6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}}{11,78 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \cdot 1,90 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 2,96 \cdot 10^{-12} \text{ m} = 2,96 \text{ pm}$$

Die Wellenlänge des γ -Quants ergibt sich aus

$$E = h \cdot f = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad \Rightarrow \quad \lambda = \frac{h \cdot c}{E} \quad (18.7)$$

Nach Einsetzen der Zahlenwerte erhält man daraus den (wegen der fehlenden Ruhemasse größeren) Wert von

$$\lambda = \frac{h \cdot c}{E} = \frac{6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 2,998 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{2,403 \cdot 10^{-14} \text{ J}} = 8,22 \cdot 10^{-12} \text{ m} = 8,22 \text{ pm}$$

- b) Im linken Bild ist die Spaltbreite d deutlich größer als im rechten Bild. Die von links eintreffenden Wellenfronten entsprechen den Wellenfunktionen der Quantenobjekte, diese haben lediglich einen Impuls in Ausbreitungsrichtung, es gilt also:

$$p_y = p \quad p_x = 0 \quad p_z = 0 \quad (18.8)$$

Der Spalt grenzt das Ortsintervall in X-Richtung auf eine Strecke ein, was dazu führt, dass der Ort in X-Richtung mit der Ortsunschärfe Δx bekannt ist.

Nach Passieren des Spalts tritt durch Beugung nun auch ein Impuls in X-Richtung auf, es gilt also

$$\Delta p_x > 0 \quad (18.9)$$

Der Impuls in X-Richtung lässt sich abschätzen, wenn mindestens noch das erste Beugungsminimum abgebildet wird. Gemäß den Gesetzen für den Einfachspalt ergibt sich für den Ort des 1. Minimums die Beziehung

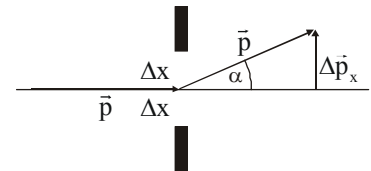
$$\sin(\alpha) = \frac{\lambda}{d} = \frac{\lambda}{2 \cdot \Delta x} \quad (18.10)$$

Zwischen Wellenlänge und Impuls gilt der Zusammenhang

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad (18.11)$$

außerdem ergibt sich aus der Zeichnung für den Winkel α die Beziehung

$$\sin(\alpha) = \frac{\Delta p_x}{p} \quad (18.12)$$



Einsetzen von (18.11) und (18.12) in (18.10) ergibt

$$\frac{\Delta p_x}{p} = \frac{h}{2 \cdot p \cdot \Delta x} \quad (18.13)$$

Kürzen von p und Multiplikation mit Δx ergibt den Ausdruck

$$\Delta p_x \cdot \Delta x \approx \frac{h}{2} \quad (18.14)$$

der der Heisenbergschen Unschärferelation entspricht.

Lsg. Ü-19

Versuchsziel: Quantenartige Anregung eines Edelgases

Aufbau: (siehe Aufgabenstellung)

Skizze: (siehe Aufgabenstellung)

Durchführung: Bei angelegter Gegenspannung von ca. 3 V wird die Beschleunigungsspannung zwischen Kathode und Anodengitter von 0 bis ca. 60 V erhöht und der Strom zwischen Auffängerelektrode und Anodengitter gemessen.

- a) Die aus der Kathode austretenden Elektronen werden im elektrischen Feld zwischen Kathode und Anodengitter zur Anode hin beschleunigt. Auf ihrem Weg zur Anode treffen sie dabei auf die Atome der Gasfüllung. Ist die Geschwindigkeit der Elektronen zu gering, um ein Elektron der Gashülle anzuregen oder zu ionisieren, finden lediglich elastische Stöße statt, bei denen die Elektronen zwar ihre Richtung ändern, aber keine Energie an das Atom abgeben.

Bei weiter steigender Beschleunigungsspannung erreichen die Elektronen die notwendige Energie, bevor sie die Auffängerelektrode erreichen. Bei den nun auftretenden unelastischen Stößen geben Sie einen Teil ihrer Energie an das Atom ab, indem sie dort ein Elektron anregen oder ganz aus der Atomhülle herausschlagen (Ionisation). Das stoßende Elektron wird nach dem Stoß erneut beschleunigt, im Atom wird das frei gewordene Energieniveau mit einem Elektron aus einem höheren Niveau wieder besetzt, die Energiedifferenz wird als Photon emittiert, was zu der sichtbaren Leuchterscheinung führt. Bei hinreichend hoher Beschleunigungsspannung kann dieser Prozess sich ggf. mehrmals wiederholen, bevor das Elektron die Anode erreicht, was zu der Schichtung der Leuchterscheinung führt

Aus der graphischen Darstellung der Messwerte kann man entnehmen, dass die von den Elektronen auf die Gasatome übertragene Energie in der Größenordnung von 19 eV liegt. Andererseits ist die Leuchterscheinung mit bloßem Auge zu beobachten, liegt also im Bereich des sichtbaren Lichtes, bei dem die entsprechenden Photonenenergien im Bereich einiger weniger Elektronenvolt liegen müssen. Dies lässt darauf schließen, dass das frei gewordene Energieniveau nicht direkt besetzt wird, sondern ein Elektron von einem höheren Energieniveau ausgehend in mehreren Schritten bis auf das Zielniveau zurückfällt. Bei jedem Energieübergang wird ein entsprechendes Photon emittiert, von denen mindestens ein Übergang im Bereich des sichtbaren Lichtes liegt.

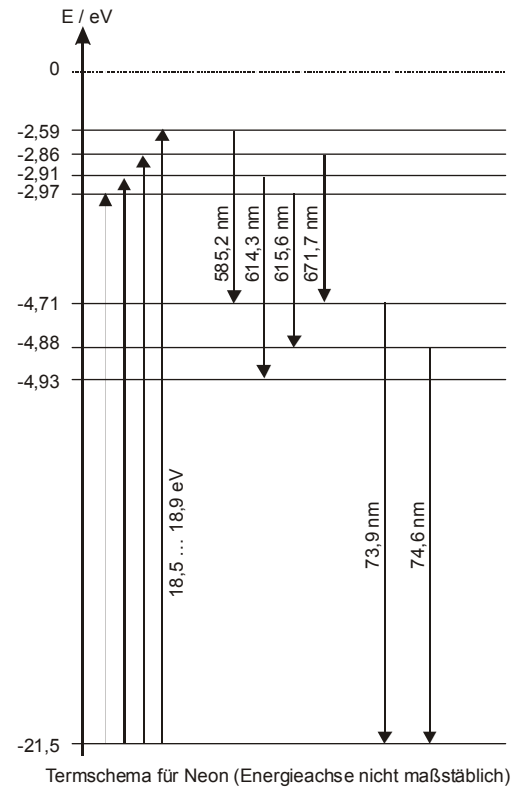
Zusätzliche Information:

Das nebenstehende Diagramm zeigt schematisch ein stark vereinfachtes Energieniveauschema (Termschema) des hier verwendeten Füllgases Neon.

Das Grundniveau hat eine Energie von -21,5 eV, es gibt weitere Niveaus in den Bereichen bei knapp -5 eV und bei -3 eV. Nicht jeder der möglichen Übergänge ist „erlaubt“, da einige dieser Niveaus bereits von Elektronen besetzt sind.

Aus dem Diagramm zum Auffängerstrom kann man entnehmen, dass bei einem unelastischen Stoß eine Energie von 19 eV übertragen wird. Diese reicht offensichtlich nur aus, um ein Elektron aus dem Grundzustand auf einen der oberen freien Anregungszustände zwischen -2,5 und -3 eV zu bringen - es findet also keine Ionisation statt (dann hätte die übertragene Energie bei 21,5 eV liegen müssen).

Die Abregung dieser angeregten Zustände erfolgt nicht in einem einzigen Schritt, sondern beginnt mit einem Übergang auf eines der mittleren Niveaus, wobei die Wellenlängen der dabei emittierten Photonen alle im sichtbaren Bereich des Lichtes (Rot bis gelb) liegen. Diese führen zu einem orangefarbenen Gesamteindruck des emittierten Lichtes in den beobachtbaren Leuchtschichten der Röhre. Die weiteren Übergänge von dort zum Grundniveau liegen mit ca. 75 nm im UV-Bereich und sind mit bloßem Auge nicht zu sehen (und werden auch bereits durch das Glas der Röhre weitgehend absorbiert).



b) Bis zu einer Beschleunigungsspannung von ca. 3 V ist kein Strom zwischen Anode und Auffängerelektrode zu messen, die Elektronen werden zwar bis zur Anode beschleunigt, im anschließenden entgegengesetzt gerichteten Feld werden sie jedoch wieder abgebremst und können die Auffängerelektrode deshalb nicht erreichen.

Bei weiter bis bis zu knapp 20 V steigender Spannung steigt der Strom zwischen Anode und Auffängerelektrode stetig an. Die Elektronen haben nunmehr genügend Energie, um gegen das Feld der Auffängerelektrode anzulaufen und können so zu einem Stromfluss beitragen. Mit den Gasatomen finden lediglich elastische Stöße statt.

Oberhalb einer Spannung von 20 V sinkt der Auffängerstrom wieder ab. Dies ist darauf zurückzuführen, dass nun eine größere Zahl von Elektronen die für unelastische Stöße mit den Gasatomen hinreichende Energie erreicht haben und durch solche Stöße einen großen Teil ihrer Energie wieder verlieren. Damit können sie auch nach Erreichen der Anode nicht mehr das Gegenfeld durchlaufen und der Auffängerstrom nimmt wieder ab.

Bei weiter steigender Spannung genügt die Reststrecke bis zur Anode, damit die Elektronen wieder genügend Energie aufnehmen, um trotz des vorausgegangenen Energieverlustes das Bremsfeld zu überwinden und der Auffängerstrom steigt wieder an. Je höher die Beschleunigungsspannung ist, desto häufiger können die Elektronen unelastische Stöße ausführen und dennoch wieder eine hinreichend große Energie durch erneute Beschleunigung aufnehmen, um das Bremsfeld zu überwinden, was auch die mit zunehmender Spannung steigende Anzahl der Leuchtschichten erklärt. Aus der Differenz zweier Maxima (oder Minima) lässt sich ablesen, dass die für einen unelastischen Stoß benötigte Energie in der Größenordnung von 20 eV liegen muss.

Die Tatsache, dass die Stromminima bei steigender Spannung zunehmen, zeigt, dass nicht alle Elektronen auf ihrem Weg von der Kathode zur Anode durch unelastische Stöße abgebremst werden.