



GRUNDPRAKTIKUM

A2: Franck-Hertz-Versuch

Autor:

■■■■■■■■■■

Partner:

■■■■■■■■■■

Versuchsdatum: ■■■■■■

Versuchsplatz: ■■■■■■■■■■

Abgabedatum: ■■■■■■

Inhaltsverzeichnis

1	Physikalische Grundlagen und Aufgabenstellung	2
2	Messwerte und Auswertung	2
2.1	Der Versuch mit Quecksilber	2
2.2	Der Versuch mit Neon	4
2.3	Diskussion der Leuchterscheinungen im Neon-Versuch	4
3	Fehleranalyse und kritische Ergebniseinschätzung	6

1 Physikalische Grundlagen und Aufgabenstellung

Im Versuch A2 kann der bekannte Franck-Hertz-Versuchsaufbau dazu genutzt werden, die Bohrschen Postulate zu bestätigen. Dazu wird das Verhalten von Quecksilber- und Neonatomen bei Stößen mit beschleunigten Elektronen untersucht. Eine detaillierte Beschreibung des Versuchsaufbaus und der physikalischen Grundlagen befindet sich im gelben Skript [Mü 12, S. 31-36], deswegen soll hier nur ein kurzer Überblick gewährt werden.

Im ersten Versuch wird Quecksilber-Gas bei einer Temperatur von 180°C verwendet. Mit Hilfe einer Beschleunigungsspannung, die sägezahnförmig von 0 auf etwa 30V erhöht wird, werden Elektronen durch die Gasröhre geschickt um mit dem Gas zu kollidieren. Die entstehende Strom-Spannungs-Kennlinie wird mit einem X-Y-Schreiber geplottet. Aus den Abständen der Extrema der Kurve kann dann die mittlere erste Anregungsenergie gemäß der Formel (5) bestimmt werden.¹

Im zweiten Versuch wird eine mit Neongas gefüllte Röhre verwendet. Dabei kann einerseits wie im ersten Versuch die Anregungsenergie des Neon-Atoms bestimmt werden. Die Abregung verläuft in diesem Fall allerdings komplexer, was es darüber hinaus auch erlaubt, durch in der Röhre auftretende Leuchterscheinungen die Bohrschen Postulate auf eine zweite Weise zu bestätigen.

2 Messwerte und Auswertung

2.1 Der Versuch mit Quecksilber

Der Versuch wurde skriptgemäß durchgeführt. Mit Hilfe des Oszilloskops wurde die Kurve optimal justiert, so dass der Plot schließlich bei einer Saugspannung $U_s = (1,91 \pm 0,03) \text{ V}$, einer Gegenspannung $U_g = (1,03 \pm 0,02) \text{ V}$ und einer maximalen Beschleunigungsspannung von $U_{b,max} = (31,03 \pm 0,32) \text{ V}$ angefertigt wurde. Die Unsicherheiten der Spannungen ergeben sich aus hier aus dem angenommenen Gerätefehler $u_U = 1\% \cdot U + 0,01 \text{ V}$ des Franck-Hertz-Betriebsgerätes. Die Temperatur des Quecksilbergases befand sich während des Versuches im Bereich $T \approx 180^\circ\text{C}$.

Um die gesuchte mittlere erste Anregungsenergie von Quecksilber E_Q zu ermitteln, mussten nun Abstände auf dem Plot (siehe Anhang) gemessen werden. Als Skalierungsfaktor wurde

$$\varepsilon = \frac{l_0}{U_{b,max}} = (0,124 \pm 0,002) \frac{\text{mm}}{\text{V}}$$

errechnet, wobei $l_0 = (251 \pm 2,26) \text{ mm}$ die Gesamtlänge vom ersten bis zum letzten aufgenommenen Punkt auf der x-Achse bezeichnet. Die Unsicherheit u_{l_0} ergibt sich aus dem Gerätefehler des X-Y-Schreibers von 0,5% vom Messwert, sowie einem Ablesefehler auf dem Millimeterpapier von 1mm, der Aufgrund des zweimaligen

¹Verweise in runden Klammern beziehen sich auf die Versuchsbeschreibung im gelben Skript.

Ablesens doppelt zählt. Die Unsicherheit des Skalierungsfaktors ergibt sich dann als

$$u_\varepsilon = \left(\left| \frac{u_{l_0}}{l_0} \right| + \left| \frac{u_{U_b}}{U_{b,max}} \right| \right) \cdot \varepsilon.$$

Der Abstand vom ersten Maximum zum letzten Maximum beträgt $s_{max} = (197 \pm 2) \text{ mm}$, was bei 5 Maxima einen durchschnittlichen Abstand von $\bar{s}_{max} = (39,4 \pm 0,4) \text{ mm}$ ergibt. Analog wird aus dem Abstand zwischen dem ersten und letzten Minimum $s_{min} = (205 \pm 2) \text{ mm}$ ein mittlerer Abstand von $\bar{s}_{min} = (41,0 \pm 0,4) \text{ mm}$ für die 5 Minima berechnet. Die Unsicherheiten ergeben sich hier analog zur Bestimmung von u_{l_0} , jeweils dividiert durch die Anzahl der beobachteten Extrema $n = 5$.

Tabelle 1: Bestimmung von E_Q

$U_s \text{ [V]}$	$1,91 \pm 0,03$
$U_g \text{ [V]}$	$1,03 \pm 0,02$
$U_b \text{ [V]}$	$31,03 \pm 0,32$
$l_0 \text{ [mm]}$	251 ± 2
$\varepsilon \left[\frac{\text{mm}}{\text{V}} \right]$	$0,124 \pm 0,002$
$\bar{s}_{max} \text{ [mm]}$	$39,4 \pm 0,4$
$\bar{s}_{min} \text{ [mm]}$	$41,0 \pm 0,4$
$\bar{s} \text{ [mm]}$	$40,2 \pm 1,2$

Jetzt wird ein Mittelwert $\bar{s} = (40,2 \pm 1,2) \text{ mm}$ aus \bar{s}_{min} und \bar{s}_{max} errechnet. Sein Fehler ergibt sich als

$$u_{\bar{s}} = \frac{u_{\bar{s}_{min}}}{2} + \frac{u_{\bar{s}_{max}}}{2} + \left| \frac{\bar{s}_{max} - \bar{s}_{min}}{2} \right|.$$

wobei die ersten zwei Terme der Fehlerfortpflanzung der beiden benutzten Größen, und der dritte Term dem abgeschätzten statistischen Fehler geschuldet sind. Es ist zu beachten, dass die hier gewählte Methode den Fehler relativ klein abschätzt; die Berechnung der Einzelabstände zwischen den Extrema und die Bildung einer Standardabweichung würde einen größeren Fehler liefern. Auf diesen alternativen Weg wurde bewusst verzichtet, da durch die mehrfache, recht ungenaue Messung auf dem Millimeterpapier unnötige Unsicherheiten provoziert worden wären ohne das Messergebnis zu verbessern.

Die gesuchte Anregungsenergie E_Q kann nun mit Hilfe des Skalierungsfaktors ε aus $E_Q = e \cdot \varepsilon \cdot \bar{s}$ berechnet werden, wobei e die Elementarladung beschreibt. Die Unsicherheit u_{E_Q} ergibt sich als

$$u_{E_Q} = \left(\left| \frac{u_\varepsilon}{\varepsilon} \right| + \left| \frac{u_{\bar{s}}}{\bar{s}} \right| \right) \cdot E_Q.$$

Das vollständige Messergebnis lautet so:

$$E_Q = (4,97 \pm 0,24) \text{ eV}$$

2.2 Der Versuch mit Neon

Für den ersten Teil des Versuches mit Neon wurde vollständig analog zum vorhergehenden Abschnitt vorgegangen, die Fehlerrechnungen sind identisch. Die eingestellten Spannungen betrugen hier $U_s = (2,73 \pm 0,04) \text{ V}$, $U_g = (10,11 \pm 0,11) \text{ V}$ und $U_{b,max} = (77,80 \pm 0,11) \text{ V}$. Die Gesamtlänge des Plots wurde mit $l_0 = (256 \pm 2,28) \text{ mm}$ gemessen, was einen Skalierungsfaktor von $\varepsilon = (0,304 \pm 0,003) \frac{\text{V}}{\text{mm}}$ ergibt.

Tabelle 2: Bestimmung von E_N

$U_s [\text{V}]$	$2,73 \pm 0,04$
$U_g [\text{V}]$	$10,11 \pm 0,11$
$U_b [\text{V}]$	$77,80 \pm 0,79$
$l_0 [\text{mm}]$	256 ± 2
$\varepsilon [\frac{\text{mm}}{\text{V}}]$	$0,304 \pm 0,003$
$\bar{s}_{max} [\text{mm}]$	$62,7 \pm 0,6$
$\bar{s}_{min} [\text{mm}]$	$59,0 \pm 0,8$
$\bar{s} [\text{mm}]$	$60,8 \pm 2,5$

Die Abstände beim Versuch mit Neon betragen $s_{max} = (188 \pm 2) \text{ mm}$ und $s_{min} = (118 \pm 2) \text{ mm}$ für 3 bzw. 2 Extrema, also $\bar{s}_{max} = (62,7 \pm 0,6) \text{ mm}$ und $\bar{s}_{min} = (59,0 \pm 0,8) \text{ mm}$. Der Mittelwert für die Abstände der Extrema lautet also $\bar{s} = (60,8 \pm 2,5) \text{ mm}$. Auch hier wurden die Fehlerrechnungen analog zu oben durchgeführt.

Für die mittlere Anregungsenergie von Neon E_N und ihre Unsicherheit u_{E_N} , die wie u_{E_Q} berechnet wird, ergibt sich schließlich:

$$E_Q = (18,49 \pm 0,94) \text{ eV}$$

2.3 Diskussion der Leuchterscheinungen im Neon-Versuch

Beschreibung der Leuchterscheinung

Um die Leuchterscheinungen in der Neon-Röhre gut beobachten zu können, wurde eine Saugspannung von $U_s = (5,1 \pm 0,1) \text{ V}$ gewählt. Die Saugspannung bestimmt dabei lediglich die Intensität des beobachteten Leuchtens, nicht aber seine Position oder Bewegung. Da das Leuchten nur zwischen den zwei Gittern untersucht wurde ist die Gegenspannung U_g in diesem Versuch irrelevant.

Es wurde nun manuell die Beschleunigungsspannung U_b von 0 auf etwa 80 V erhöht. Dabei konnten folgende Beobachtungen gemacht werden:

1. Bei $U_b \approx 19 \text{ V}$ wird eine erste orange leuchtende Kreisscheibe am Gitter G2, also in der Nähe der Anode, sichtbar.
2. Wird U_b weiter erhöht wandert die Kreisscheibe in Richtung der Mitte zwischen den beiden Gittern.

3. Bei $U_b \approx 36 \text{ V}$ taucht eine zweite Scheibe an G2 auf, die erste Scheibe befindet sich nun fast in der Mitte der Röhre.
4. Weiteres Erhöhen von U_b lässt beide Scheiben in Richtung G1 wandern, dabei wird auch der Abstand zwischen Scheibe 1 und Scheibe 2 kleiner, d.h. Scheibe 2 bewegt sich schneller.
5. Weitere Scheiben werden bei $U_b \approx 55 \text{ V}$ und 70 V sichtbar, wobei hier die einzelnen Scheiben nicht mehr leicht voneinander zu trennen sind.

Die Scheiben leuchten orangerot und haben eine konvexe Form, d.h. sie haben einen Bauch in Richtung der Kathode, dessen Krümmung mit dem Abstand der Scheibe von G2 abnimmt. Die Scheiben sind zwar deutlich sichtbar, aber leicht unscharf, was es bei mehr als drei gleichzeitig sichtbaren Scheiben schwierig macht, klare Trennlinien zu erkennen. Die Intensität der Scheiben ist in der Mitte am höchsten und nimmt nach außen hin ab.

Physikalische Interpretation der Phänomene

Das Phänomen der auftretenden Scheiben bestätigt die Bohrschen Postulate: sobald die im Kraftfeld der Röhre beschleunigten Elektronen eine gewisse Geschwindigkeit erreicht haben, besitzen sie genügend kinetische Energie, um in unelastischen Stößen die sich in der Röhre befindlichen Atome anzuregen. Die Abregung der angeregten Neon-Atome geht dann mit Lichtemissionen einher, die sich als sichtbares Glühen manifestieren. Wie von den Bohrschen Postulaten verlangt tritt ein solches Glühen unterhalb einer kritischen Spannung nicht auf, da die Elektronen keine nicht-quantisierten Energieportionen an die Atome abgeben können: sollte das Elektron zu langsam für eine Anregung von Neon sein, findet ein elastischer Stoß statt, der keine Lichtemission verursacht. Die Abwesenheit von leuchtenden Scheiben deutet also darauf hin, dass die an der Kathode emittierten Elektronen innerhalb der Röhre die erforderliche kinetische Energie nicht erreichen.

Das Wandern der Scheiben erklärt sich durch die Stärke des angelegten Feldes, das proportional zu U_b ist: je stärker das Feld, desto schneller haben die Elektronen die kritische kinetische Energie für einen unelastischen Stoß, und desto näher an der Kathode findet dieser statt. Die leuchtende Scheibe läuft also langsam vom äußersten Rand in Richtung Kathode.

Das Auftreten multipler Scheiben erklären sich analog: wenn die Beschleunigung durch U_b stark genug ist, dann können die Elektronen innerhalb der Röhre sogar zwei- oder dreimal nacheinander ausreichend Energie für eine Anregung sammeln. Nach jedem Stoß wird das Elektron, das ja nun Energie verloren hat, dann wieder beschleunigt und erreicht erneut die kritische kinetische Energie. Das Auftreten der zusätzlichen Scheiben fällt mit Vielfachen der von Neon verlangten Anregungsenergie (etwa 19 eV) zusammen, also immer nach den Minima der Strom-Spannungskennlinie. Ein Minimum auf der Kennlinie bedeutet, dass die Gegenspannung U_g nicht überwunden werden kann. Das ist genau dann der Fall, wenn der letzte unelastische Stoß noch vor G2 stattfindet, und die Elektronen danach nicht mehr schnell genug sind, um U_g zu überwinden.

Die erwähnte Konvexität der Scheiben und ihre Unschärfe erklären sich wie folgt: Wenn ein beschleunigtes Elektron und ein Neonatom zusammenstoßen, die Energie aber nicht für eine Anregung ausreicht, findet ein elastischer Stoß statt. Dabei tritt keine Lichtemission auf, aber das Elektron wird um bis zu 180° abgelenkt. Zusätzlich haben die aus der Kathode austretenden Elektronen unterschiedliche Anfangsgeschwindigkeiten gemäß der Fermi-Dirac-Verteilung. Einige Elektronen haben also schneller die kritische kinetische Energie erreicht und sorgen mit ihren Stößen für Lichtemissionen.

Schließlich erklärt sich die rotorange Farbe mit den Anregungseigenschaften von Neon. Die Anregung findet bei etwa 19 eV statt, die Abregung erfolgt allerdings - quantenmechanisch begründet - über Stufen, wobei zuerst auf etwa 16,5 eV bis 16,8 eV, und erst dann in den Grundzustand zurückgekehrt wird. Es finden also zwei oder mehr Emissionen statt, wovon nur die erste im sichtbaren Spektrum liegt, während die zweite im UV-Bereich stattfindet.

3 Fehleranalyse und kritische Ergebniseinschätzung

Die Messergebnisse liegen nahe bei den Literaturwerten von 4,9 eV Anregungsenergie bei Quecksilber [FH 14] und etwa 18-20 eV beim Versuch mit Neon [CE 12, S. 4]. Die beobachteten Phänomene erlauben es, die Bohrschen Postulate zur Quantisierung von Energietransfer zu bestätigen. Eine weitere Verbesserung der Messergebnisse bzw. ihrer Unsicherheiten ist mit dem gegebenen Messaufbau vermutlich am ehesten durch ein Wiederholen der Messung zu erreichen.

Bei Betrachtung des Plots ist zu beachten, dass die Kurve um die Differenz des Kontaktpotentials zwischen Gitter und Kathode verschoben ist, eine Achsenbeschriftung mit spezifischen Werten für I_A und U_b also wenig Sinn macht.

Literatur

- [CE 12] CERN Teachers Lab. *Franck-Hertz-Versuch* Online abrufbar unter <http://project-physteaching.web.cern.ch/project-physteaching/german/experimente/franck-hertz.pdf> (17.06.2012).
- [FH 14] Franck, J., Hertz, G., *Über Zusammenstöße zwischen Elektronen und den Molekülen des Quecksilberdampfes und die Ionisierungsspannung desselben*. 1914.
- [Mü 07] Müller, U. *Einführung in die Messung, Auswertung und Darstellung experimenteller Ergebnisse in der Physik*. 2007.
- [Mü 12] Müller, U. *Physikalisches Grundpraktikum. Mechanik und Thermodynamik*. 2012.