

FH Franck-Hertz-Versuch und Röntgenspektren

1. Literatur, Stichworte

Bergmann-Schäfer: Lehrbuch der Experimentalphysik, Bd. 4 (Entwicklung der Atomphysik, Atommodell); Haken/Wolf: Atom- und Quantenphysik (Spektroskopische Vorbemerkungen, Bohrsches Atommodell, Franck-Hertz-Versuch); Maier-Kuckuk: Atomphysik

2. Zur Geschichte des Franck-Hertz-Versuchs

Im Jahre 1911, nachdem bei Streuexperimenten der Atomkern entdeckt worden war (die Existenz der Elektronen, ihre Masse und Ladung waren schon bekannt), stellte Rutherford das nach ihm benannte Atommodell auf. Danach kreisen die negativ geladenen Elektronen, ähnlich den Planeten im Sonnensystem, auf Kreisbahnen um den schweren, positiv geladenen Atomkern. Der Gravitationskraft des Planetenmodells entspricht die Coulomb-Anziehungskraft entgegengesetzter Ladungen.

Nach der klassischen Elektrodynamik müsste das Elektron als (zentripetal) beschleunigte Ladung elektromagnetische Strahlung aussenden, deshalb ständig Energie verlieren und schließlich in den Atomkern stürzen. Dieser Widerspruch zur klassischen Physik wurde durch die Quantenphysik aufgelöst. Bereits 1900 hatte Planck die erste Quantenhypothese aufgestellt, mit deren Hilfe es ihm möglich war, das Gesetz der elektromagnetischen Temperaturstrahlung aufzustellen. Er postulierte, dass elektromagnetische Wellen der Frequenz f nur in Quanten, also in ganzzahligen Vielfachen der Energie $E = h \cdot f$ von Materie emittiert werden können ($h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$ ist eine fundamentale Naturkonstante. Sie heißt Plancksches Wirkungsquantum). 1905 zeigte Einstein, dass Licht tatsächlich aus Energiequanten, den sogenannten Photonen, besteht. Dadurch inspiriert ergänzte Bohr 1913 das Rutherford'sche Atommodell durch die beiden folgenden Forderungen:

1. Es sind nur Elektronenbahnen erlaubt, bei denen der Betrag des Bahndrehimpulses l ein ganzzahliges Vielfaches des Drehimpulses $\frac{h}{2\pi}$ beträgt.
2. Strahlungsübergänge⁶ sind nur zwischen Elektronenzuständen, deren Energien E_1 und E_2 zwei erlaubten Bahnen entsprechen, möglich. Die Photonenenergie E ist also gegeben durch $E = h \cdot f = E_2 - E_1$.

Eine direkte experimentelle Bestätigung der Bohrschen Postulate gab es vor dem Franck-Hertz-Versuch nicht. Die diskreten optischen Spektren der Atome weisen zwar auf wohldefinierte Abstände zwischen den Elektronenzuständen eines Atoms hin, aber könnte es nicht

⁶Das sind Übergänge der Hüllenelektronen unter Emission elektromagnetischer Strahlung. Atome befinden sich ohne äußere Einflüsse im energetisch niedrigsten Zustand, dem Grundzustand. Durch Anheben eines Elektrons auf eine energetisch höhere Bahn geht das Atom in einen *angeregten* Zustand über. Angeregte Zustände haben mittlere Lebensdauern von 10^{-9} bis 10^{-7} s , bevor sie unter Emission eines Lichtquants in den Grundzustand zurückkehren.

neben den in den Spektren sichtbaren diskreten Elektronenzuständen noch kontinuierlich verteilte Zustände geben? Dann sollte man beliebige Energien auf die Atome übertragen können.

Zur Anregung von Atomen kann man freie Elektronen an den Atomen streuen. Wenn die Elektronenenergie kleiner als die niedrigste Anregungsenergie der Atome ist, sind nur elastische Stoßprozesse möglich. In diesem Fall ändert der Stoßvorgang die innere Energie der Atome nicht. Weil die Atommasse sehr viel größer als die Elektronenmasse ist, behalten die Elektronen bei elastischen Stößen ihre kinetische Energie fast vollständig. Wenn die Elektronenenergie jedoch ausreicht, die Atome anzuregen, sind inelastische Stöße möglich, welche die kinetische Energie des stoßenden Elektrons um die Anregungsenergie des Atoms verringern.

Beim Franck-Hertz-Versuch werden Elektronen durch ein elektrisches Feld beschleunigt. Beim Durchlaufen einer Spannung U nimmt die Energie eines Elektrons um $e \cdot U$ zu (e ist die Elementarladung). Im Beschleunigungsraum befinden sich Neonatome. Bei einer bestimmten Beschleunigungsspannung, die einer bestimmten maximalen Elektronenenergie entspricht, setzt die inelastische Streuung ein. Misst man nun den Strom der Elektronen, deren Energie über einer kleinen Schwelle $e \cdot U_G$ liegt, so ist das Einsetzen der inelastischen Streuung an der Abnahme des Anteils der Elektronen, deren Energie ausreicht, diese Schwelle zu überschreiten, zu erkennen. Steigert man die Beschleunigungsspannung weiter, so steigt der Strom der schnellen Elektronen wieder an, bis die Energie für zwei inelastische Stöße ausreicht, was zu einer erneuten Abnahme des Stroms schneller Elektronen führt. Dieses Spiel kann mehrmals wiederholt werden. Der Franck-Hertz-Versuch zeigt also, dass Neonatome, die sich im Grundzustand befinden, Energien unterhalb einer bestimmten Schwelle nicht aufnehmen können.

3. Röntgenenergiespektren

Zur Untersuchung der Struktur der Atomhülle ist der Franck-Hertz-Versuch nur bedingt geeignet. Zum einen ist die Energie der stoßenden Elektronen durch die verwendete Glühkathode nicht konstant, zum anderen werden bei den von uns verwendeten Energien von max. 80 eV nur Elektronen auf den äußeren Schalen angeregt, wo bereits bei Neon das Termschema nicht mehr trivial ist (s. letzte Seite dieser Anleitung), die inneren Elektronen schirmen den Kern stark ab und die Spin-Bahn-Kopplung hebt die Entartung in den äußeren Schalen immer stärker auf.

Die Energiespektren werden einfacher, wenn man Elektronen aus den inneren Schalen von Atomen mit möglichst hohem Z entfernt und die bei der Abregung freiwerdende Energie misst. Dann ist die Abschirmung nur noch eine Korrektur und die Energieniveaus lassen sich entsprechend des einfachen Bohrschen Modells berechnen:

$$E_B = 13.6\text{eV} \cdot \frac{Z_{\text{eff}}^2}{n^2} \quad (\text{FH.1})$$

Dabei sind $Z_{\text{eff}} = Z - s$ die effektive Kernladungszahl und n die Hauptquantenzahl. Wie man leicht sieht, sind für Elemente mit $Z > 10$ allerdings Anregungsenergien im keV-Bereich

nötig. Meist setzt man dafür Röntgenstrahlen ein, daher hat sich für diese Schalen mit nicht überlappenden Unterschalen der Begriff „Röntgenschalen“ eingebürgert. Für diese liegt die Korrektur s im Bereich von 1 bis 2.

Nach der Ionisation der Hülle springt ein Elektron aus einer äußeren Schale in das freiwerdende Loch, dabei wird charakteristische Röntgenstrahlung der Energie

$$E = 13.6\text{eV} \cdot (Z - s)^2 \cdot \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right) \quad (\text{FH.2})$$

freigesetzt. Dieser bereits 1913 empirisch von Moseley gefundene Zusammenhang ermöglichte die Bestimmung der effektiven Kernladungszahl unbekannter Proben und hat bei der Zuordnung der Kernladungszahl zu den Elementen eine wichtige Rolle gespielt. In unserem Versuch werden wir analog zur Spektrometrie von γ -Strahlung versuchen, aus der Lage der Emissionlinien unter Benutzung von Bibliotheken unbekannte Elemente in den Proben zu identifizieren.

4. Versuchsaufbau

4.1. Die Franck-Hertz-Röhre

Die Franck-Hertz Röhre ist weitgehend evakuiert. Sie enthält jedoch ein wenig Neon. Mit einer elektrisch geheizten Glühkatode können freie Elektronen erzeugt werden; bei ausreichend hoher Katodentemperatur können Elektronen aus der Glühkatode wie Wassermoleküle aus einer Wasseroberfläche „verdampfen“. Sie werden durch ein elektrisches Feld zur Anode hin beschleunigt. Die Elektronen stoßen auf ihrem Weg zur Anode mit Neonatomen zusammen. Durch die Lücken der gitterförmigen Anode können einige Elektronen den dahinter liegenden Auffänger erreichen. Der Auffänger ist gegenüber der Anode schwach negativ vorgespannt. Deshalb tragen Elektronen, die nach einem Stoß Energien unterhalb der durch die Gegenspannung U_G definierten Schwelle $E_S = e \cdot U_G$ haben, nicht zum Auffängerstrom bei. Damit ist der Auffängerstrom ein Maß dafür, ob und wieviele der beschleunigten Elektronen ihre Energie auf die Hüllenelektronen übertragen konnten.

4.2. Das Betriebsgerät

Die Abbildung FH.1 zeigt die Vorderansicht des Betriebsgeräts (Firma NEVA). Es hat folgende Aufgaben:

1. Erzeugung der Heizspannung für die Glühkatode (H)
2. Erzeugung der Beschleunigungsspannung (konstant oder Sägezahn) (B)
3. Erzeugung der Spannung zwischen Katode und Steuergitter (S)
4. Verstärkung des Auffängerstroms (V)

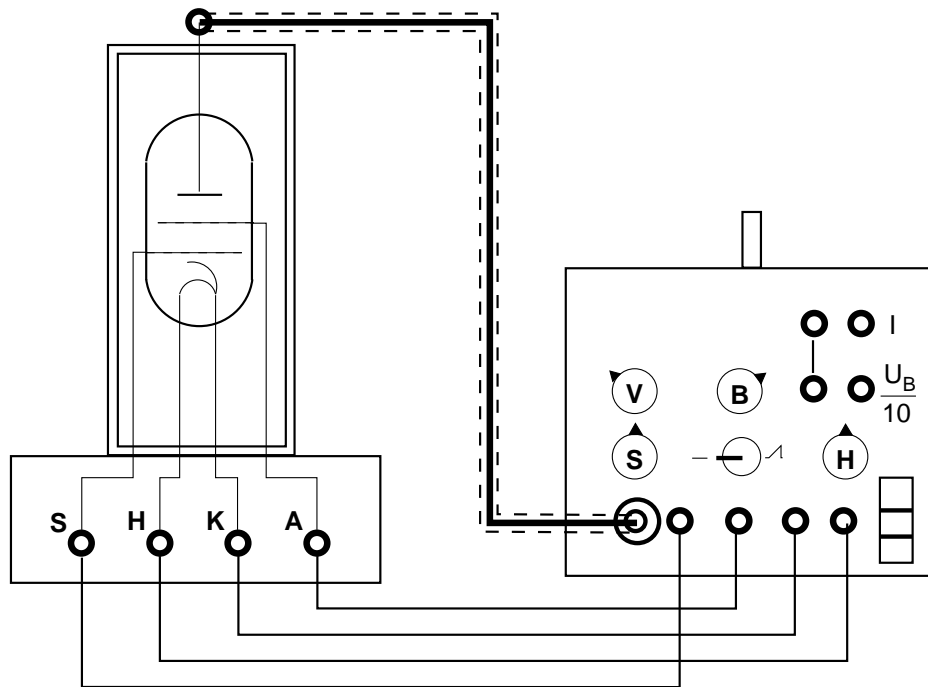


Abbildung FH.1: Franck-Hertz-Röhre und Betriebsgerät

Die Franck-Hertz-Röhre wird über mehrere Kabel an das Betriebsgerät angeschlossen, deren Beschriftung und Farbmarkierung eine eindeutige Zuordnung erleichtert. Der Auffängerstrom schließlich wird über ein BNC-Koaxialkabel zum Betriebsgerät geführt. Der in das Betriebsgerät eingebaute Verstärker wandelt den Auffängerstrom (einige nA) in eine proportionale Spannung im Bereich von 0...12 V um. Die Empfindlichkeit ist so groß, dass eine Bewegung des BNC-Kabels, das den Auffänger mit dem Verstärkereingang verbindet, die Anzeige vorübergehend merklich ändern kann.⁷ Legen Sie das Kabel also so, dass es während der Messungen nicht bewegt oder deformiert wird.

An vier Buchsen an der Frontplatte des Bedienungsgeräts sind die um den Faktor 10 abgeschwächte Beschleunigungsspannung und das Ausgangssignal des Verstärkers für den Auffängerstrom zugänglich. Mit diesen Signalen kann die Franck-Hertz-Kurve auf dem Bildschirm eines Oszilloskops dargestellt werden. Um die Kurve zu erzeugen, ist der Auffängerstrom-Ausgang mit dem Y-Eingang des Oszilloskops zu verbinden, der Beschleunigungsspannungs-Ausgang oder der Ausgang $U_B/10$ mit dem X-Eingang. Das Betriebsgerät ist in die Betriebsart „Sägezahn“ zu schalten. In dieser Betriebsart verändert das Betriebsgerät die Beschleunigungsspannung periodisch entsprechend einer Sägezahnkurve⁸.

⁷Grund dafür ist Reibungselektrizität, die bei einer Verschiebung der Kabelseele bezüglich des Kabeldielektrikums auftritt.

⁸Genau genommen folgt die Beschleunigungsspannung dem positiven Teil einer Sinuskurve mit 50 Hz. Der Verstärker wandelt die Stromstärke von $U_B = 0$ ansteigend bis zum Erreichen der eingestellten max. Beschleunigungsspannung

Mit Hilfe des digitalen Oszilloskops Tektronix TDS 3012 kann die Kurve mit 10000 Messpunkten digitalisiert und als Tabelle auf Diskette gespeichert werden. Die dazu notwendigen Schritte werden Ihnen vom Assistenten gezeigt.

Alternativ können Sie die Franck-Hertz-Kurve mit CASSY-Lab aufnehmen, unter dem Benutzerkonto „Praktikum“ finden Sie auf dem Desktop ein CASSY-Symbol mit dem Setup „Franck-Hertz“.

Vor dem Einschalten des Betriebsgeräts sollten alle Verbindungen zwischen Franck-Hertz-Röhre und dem Betriebsgerät hergestellt sein.

4.3. Das Röntgengerät

Für die Durchführung des Versuches wird das Röntgengerät

4.4. Versuchsdurchführung

Man erwartet zunächst einen Stromverlauf, der bei ganzen Vielfachen der Quantenenergie scharfe Einbrüche zeigt. Tatsächlich wird die gemessene Kurve durch mehrere Effekte verschmiert:

- Die aus der Glühkatode austretenden Elektronen haben auf Grund der Katodentemperatur unterschiedliche, von null verschiedene Energien. Die Breite der Energieverteilung ist durch die Katodentemperatur bestimmt.
- Die Neonatome, auf die die beschleunigten Elektronen stoßen, sind nicht in Ruhe, sondern haben ebenfalls unterschiedliche Geschwindigkeiten. Die Breite der Verteilung der kinetischen Energien der Neonatome ist durch die Raumtemperatur bestimmt. Schätzen Sie aus den mittleren Geschwindigkeiten der Elektronen und Ne-Atome ab, wie groß diese Dopplerverbreiterung ist.
- Die Energie der Elektronen wird auch durch elastische Stöße mit den Neonatomen verändert. Zwar sind die Energieänderungen durch elastische Streuung nur klein, aber ein Elektron kann vor dem ersten inelastischen Stoß und ebenso zwischen zwei inelastischen Stößen eine große Zahl von elastischen Stößen erfahren.
- Zuweilen kann ein Elektron auf ein bereits angeregtes Neonatom treffen. Dieses kann in höhere Zustände angeregt werden und dabei andere Energien aufnehmen. Wie kann man diesem Problem begegnen?

Neben der Verschmierung zeigt die Franck-Hertz-Kurve auch noch systematische Fehler.

- Wenn unterschiedliche Metalle in Kontakt kommen, bildet sich an der Berührungsstelle die sogenannte Kontaktspannung aus. Da Katode und Anode der Franck-Hertz-Röhre aus unterschiedlichen Materialien bestehen, ist der äußeren Beschleunigungsspannung die Kontaktspannung zwischen Katode und Anode überlagert. Sie bewirkt eine Verschiebung der Franck-Hertz-Kurve in horizontaler Richtung.

- Elastische Stöße verbreitern nicht nur die Energieverteilung der Elektronen, sondern sie ändern auch die mittlere Energie.
- Ohne Neonfüllung würden der Anoden- und der Auffängerstrom mit steigender Beschleunigungsspannung $\sim U^{\frac{3}{2}}$ zunehmen. Auch in der Franck-Hertz-Kurve nimmt sowohl die Schwankung des Auffängerstroms als auch der Untergrund mit steigender Beschleunigungsspannung zu. Dadurch werden die Lagen der Minima, Maxima und Wendepunkte ein wenig verschoben.

4.5. Aufgaben

- Stellen Sie die Abhängigkeit $I(U_B)$ in einem Diagramm dar. Die Messwerte der Stromkurve werden dazu vom Digital-Oszilloskop in einer Datei auf Diskette geschrieben, welche die Spalten t_i/s , $U_{B,i}/10 V$ und $I/w.E.$ enthält. Verwenden Sie zur Auswertung Ihren PC oder Notebook und beachten Sie dabei, dass als Dezimalzeichen der Punkt und zur Trennung der Spalten das Komma verwendet wird. Falls Sie mit CASSY gemessen haben, können Sie Kurve mit CASSY zeichnen und auswerten. Zur Bestimmung der Anregungsenergie misst man die Beschleunigungsspannungswerte $U_{B,i}$, an denen der Auffängerstrom entweder ein Strommaximum oder Stromminimum annimmt. Aus den Differenzen $U_{i+1} - U_i$ bekommt man Werte E_i für die Anregungsenergie in eV sowohl für die Minima als auch für die Maxima. Bilden Sie Mittelwert und Standardabweichung des Mittelwerts aller Differenzen.
- Wenn ein Neonatom aus dem ersten angeregten Zustand in den Grundzustand zurückkehrt, emittiert es Licht. Welcher Wellenlänge entspricht die gemessene Anregungsenergie? Liegt diese Wellenlänge im Bereich des sichtbaren Lichts? Wieso beobachten Sie orangerotes Licht? Ziehen Sie dazu das Termschema von Neon (Abb. FH.2) heran.
- In welchem Wellenlängenbereich liegt sichtbares Licht? Welchem Energiebereich in eV entspricht das?

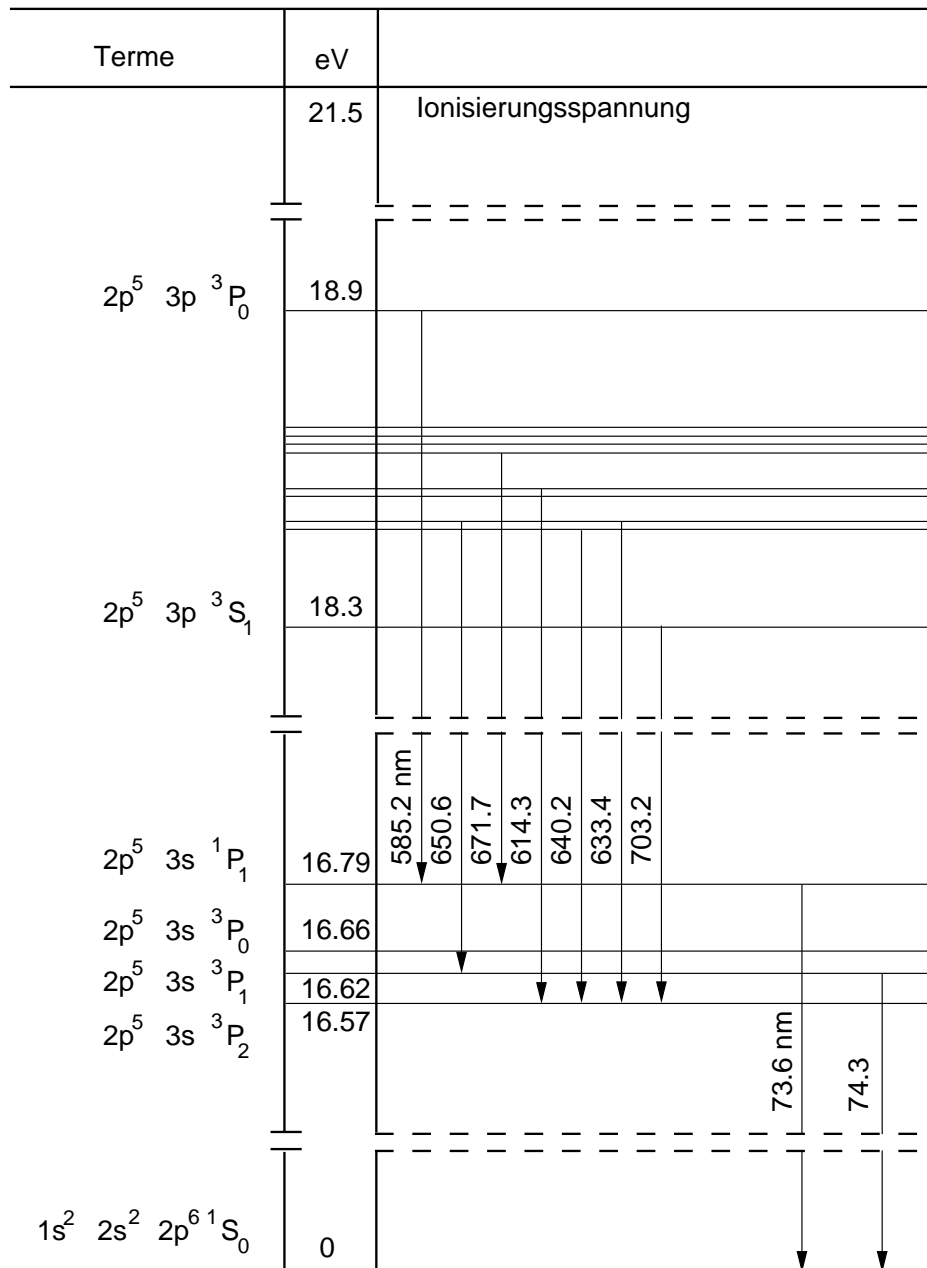


Abbildung FH.2: Termschema von Neon