

A2 FRANCK-HERTZ-VERSUCH

PHYSIKALISCHE GRUNDLAGEN

Wichtige Grundbegriffe: Atommodelle von Rutherford und Bohr, Spektrallinien, Elektronenstoßanregung, Stoßquerschnitte, Plancksches Wirkungsquantum, Kontaktpotential, Stromspannungs-Kennlinie

Geschichtliches

James Franck und Gustav Hertz berichteten 1914 über ein Experiment, bei dem Elektronen infolge unelastischer Stöße mit Quecksilberatomen ihre Energie in diskreten Portionen an die Quecksilberatome abgaben. Die Hg-Atome emittierten dabei Lichtquanten mit einer Energie, welche gerade dem Energieverlust der stoßenden Elektronen entsprach. Dies wurde in den folgenden Jahren als ein experimenteller Beweis für das bereits 1913 von Niels Bohr vorgeschlagene Atommodell gedeutet. Die Bohrschen Postulate über den Aufbau des Atoms stellen in der Physikgeschichte einen entscheidenden Schritt dar auf dem Weg zum heute anerkannten wellenmechanischen Modell, das das theoretische Fundament der Quantenmechanik des Atoms bildet. Für ihre bahnbrechenden experimentellen Arbeiten erhielten Franck und Hertz am 11.11.1926 den Nobelpreis für Physik.

Bohrsches Atommodell: Den Ausgang bildet das Rutherford'sche Modell, nach dem ein Atom aus einem positiven geladenen Kern und einer Anzahl ihn umkreisender negativ geladener Elektronen besteht und nach außen neutral erscheint. Ein solches Atom kann aber nach den Gesetzen der klassischen Elektrodynamik nicht stabil sein: Auf einer geschlossenen Kreis-

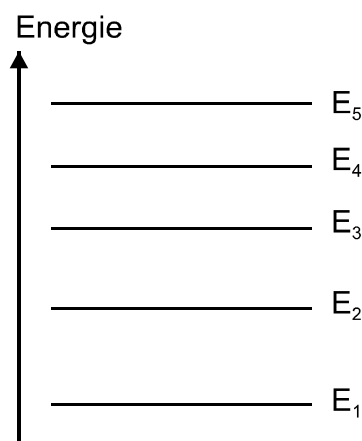


Abb. 1 Energieniveaus

bahn bewegt sich ein Elektron auch bei konstantem Geschwindigkeitsbetrag fortwährend gleichmäßig beschleunigt, es müsste also ständig Energie in Form elektromagnetischer Strahlung abgegeben werden. Der Bahnradius würde immer kleiner und die Umlauffrequenz, die gleich der Frequenz ν des abgestrahlten Lichtes ist, würde stetig zunehmen. Tatsächlich aber sind Atome beliebig lange stabil und sie liefern kein kontinuierliches Spektrum, sondern Spektren, die aus einzelnen Spektrallinien bestehen. Offensichtlich können die Gesetze der klassischen Physik inneratomare Vorgänge nicht hinreichend erklären!

Den Ausweg wies Niels Bohr, indem er zunächst *ad hoc* zwei Forderungen, die sog. **Bohrschen Postulate** aufstellte, die mit der klassischen Physik unvereinbar waren und später nach weiteren Verfeinerungen eine quantenmechanische Begründung fanden:

1. **Bohrsche Quantenbedingung:** Von allen möglichen kreisförmigen Elektronenbahnen sind nur diejenigen erlaubt, für die der Betrag des Drehimpulses l der Elektronen ein ganzzahliges Vielfaches des Planckschen Wirkungsquantums h , geteilt durch 2π , ist:

$$|l| = n \frac{h}{2\pi} \quad (1)$$

$n = 1, 2, 3, \dots$ heißt Hauptquantenzahl, durch sie wird vom Kern aus zählend die jeweilige Kreisbahn bestimmt. Diesen Kreisbahnen entspricht eine diskrete Folge von Energiewerten E_1, E_2, E_3, \dots , Zwischenzustände existieren nicht (Abb.1).

2. **Bohrsche Frequenzbedingung:** Das Elektron kann bei Energieaufnahme z.B. durch Stoßanregung oder Energieabgabe durch Lichtstrahlung sog. Quantensprünge von einer Bahn auf eine andere ausführen. Bei einem Übergang von einem Zustand mit der Energie E_n in einen Zustand mit der rel. niedrigeren Energie E_m emittiert das Atom ein Lichtquant mit der Energie

A2 FRANCK-HERTZ-VERSUCH

$$h\nu = E_n - E_m. \quad (2)$$

Dieses Modell liefert dann das „richtige“ Wasserstoffspektrum, dessen Spektrallinien mit der Rydberg-Ritz-Formel berechnet werden können.

Der Franck-Hertz-Versuch mit Quecksilber: Den Prinzipaufbau der Apparatur zeigt Abb.2. In einer mit Quecksilberdampf gefüllten Glasröhre werden von einer Glühkatode K

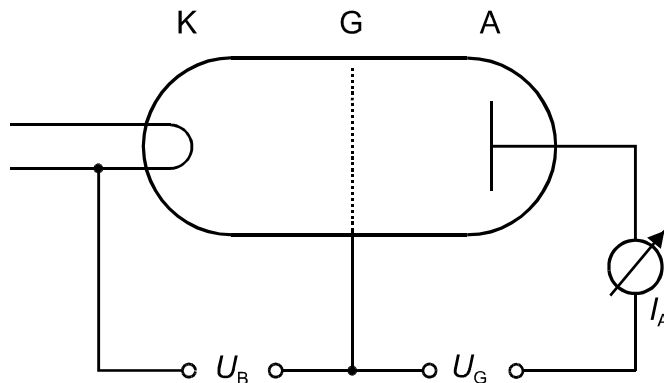


Abb. 2 Prinzip des Franck-Hertz-Versuches

Elektronen emittiert. Sie werden in einem elektrischen Feld, das durch Anlegen einer Spannung U_B zwischen Katode K und Gitter G erzeugt wird, beschleunigt. Danach treten die Elektronen in ein Bremsfeld ein, das durch die Gegenspannung U_G zwischen dem Gitter und dem dahinter befindlichen Auffänger A verursacht wird. Der Auffängerstrom I_A kann mit einem empfindlichen Amperemeter gemessen werden. Es gelangen jedoch nur die Elektronen bis zum Auffänger, deren Geschwindigkeitskomponente

v_z in Feldrichtung die Bedingung

$$\frac{m}{2} v_z^2 \geq eU_G \quad (3)$$

erfüllt (e = Elementarladung, m = Elektronenmasse). Der Rest fällt auf das Gitter zurück. Im Beschleunigungsraum zwischen Katode und Gitter können bei genügend hohem Hg-Dampfdruck Elektronen und Quecksilberatome zusammenstoßen. Dabei kann es zur Anregung des Atoms kommen, wenn die Elektronenenergie einen Wert erreicht hat, der mindestens gleich der Differenz $\Delta E = E_{A1} - E_{Gr}$ zwischen dem ersten angeregten Zustand E_{A1} und dem Grundzustand E_{Gr} des Hg-Atoms ist. Genau diese Energie ΔE kann übertragen werden, das Atom befindet sich jetzt im ersten angeregten Zustand und die kinetische Energie des Elektrons hat sich um dieses ΔE vermindert. Das Atom verweilt nur ca. 10^{-8} s im angeregten Zustand und kehrt danach unter Emission eines Lichtquants mit der Energie

$$h\nu = E_{A1} - E_{Gr} \quad (4)$$

in den Grundzustand zurück.

Die Anregung der Atome kann beobachtet werden, indem man den Auffängerstrom I_A in Abhängigkeit von der Beschleunigungsspannung U_B misst. Erhöht man U_B von null beginnend, so werden immer mehr Elektronen aus der negativen Raumladungswolke um den Glühdraht in Richtung Gitter abgesaugt und beschleunigt. Dabei wird der Auffängerstrom I_A stark ansteigen, wenn U_B die fest eingestellte Gegenspannung U_G betragsmäßig übersteigt. Erreicht die Elektronenenergie bei weiterer Steigerung von U_B den notwendigen Betrag zur Erzeugung des ersten angeregten Zustandes, so kann es diese Energie infolge eines so genannten unelastischen Stoßes an das Atom abgeben und I_A wird steil absinken, weil die Elektronen nach der Energieübertragung nicht mehr gegen das Bremsfeld zum Auffänger gelangen können. Erst bei weiterer Erhöhung von U_B kann Energie für eine zweite, dritte usw. Energieübertragung aufgenommen werden, sofern die vom Hg-Dampfdruck abhängige

A2 FRANCK-HERTZ-VERSUCH

Stoßwahrscheinlichkeit (siehe auch „Stoßquerschnitte“) und die Laufräumlänge bis zum Gitter das zulassen. Dementsprechend gibt es eine Aufeinanderfolge von Maxima und Minima des Auffängerstromes I_A und aus dem Abstand ΔU_B aufeinander folgender Maxima. In einer grafischen Darstellung $I_A = f(U_B)$ kann auf einfache Weise die erste Anregungsenergie

$$E_{A1} - E_{Gr} = e \Delta U_B \quad (5)$$

des Quecksilbers bestimmt werden. Die im UV-Bereich liegende emittierte Strahlung dieser Energie (4) kann spektroskopisch nachgewiesen werden.

Ergänzend muss auf einige Faktoren hingewiesen werden, die einen Einfluss auf die hier zuvor beschriebene Strom-Spannungs-Kennlinie, die sog. Franck-Hertz-Kurve, haben.

Das Energiespektrum der Elektronen: Bisher wurde nicht erwähnt, dass die Elektronen bereits mit unterschiedlichen Anfangsgeschwindigkeiten aus der Glühkatode austreten. Der Grund besteht darin, dass die Leitungselektronen im Metall bereits ein Energiespektrum, die sog. Fermi-Dirac-Verteilung, aufweisen. Infolgedessen haben die Elektronen auch bei Durchlaufen desselben Beschleunigungsgefälles unterschiedliche Energien. Das führt zu einer Verbreiterung bzw. Abrundung der Maxima und Minima. Die gleiche Wirkung hat eine Aufspreizung der oben erwähnten z-Komponente der Elektronengeschwindigkeit infolge elastischer Stöße mit den Atomen. Der Massenunterschied der Stoßpartner erlaubt zwar praktisch keine nennenswerte Energieübertragung, aber umso mehr erhebliche Richtungsänderungen bis zu 180° .

Das Kontaktpotential: Die Franck-Hertz-Kurve ist auf der Abszisse um das Kontaktpotential zwischen Katode und Gitter verschoben, da diese Elektroden im Allgemeinen aus unterschiedlichen Materialien bestehen (siehe auch Versuch A1). Das Kontaktpotential ist als Differenz der Austrittsarbeiten beider Materialien definiert.

Die Gasdichte: Ist die Hg-Gasdichte und damit die Stoßwahrscheinlichkeit genügend groß, so wird praktisch jedes Elektron bei oder kurz nach Erreichen der ersten Anregungsenergie $E_{A1} - E_{Gr}$ einen unelastischen Stoß ausführen und somit keine wesentlich höhere Energie aufnehmen können. Deshalb können unter diesen Betriebsbedingungen keine höheren Anregungen wie etwa $E_{A2} - E_{Gr}$ auftreten. Höhere Anregungen lassen sich grundsätzlich durch eine entsprechende Absenkung der Gasdichte über die Röhrentemperatur erreichen und spektroskopisch als eine Vielzahl von Spektrallinien nachweisen. Der Nachweis anhand der Franck-Hertz-Kurve gelingt wegen der zuvor genannten Kurvenverbreiterung und der viel geringeren Wahrscheinlichkeiten für höhere Anregungen nur andeutungsweise bei erhöhtem experimentellem Aufwand im Vergleich zu unserer Praktikumsanordnung.

Der Franck-Hertz-Versuch mit Neon: Franck-Hertz-Röhren können auch mit anderen einatomigen Gasen wie z.B. Neon betrieben werden. Im Unterschied zum Hg gibt es beim Neon aber keine sog. Resonanzanregung, das heißt, es gibt keine Spektrallinie, deren Energie $h\nu$ der beim unelastischen Stoß vom Atom aufgenommenen Energie von ca. 19 eV entspricht. Dieser Übergang ist nach den nur quantenphysikalisch begründbaren sog. Auswahlregeln „nicht erlaubt“. Der Energiesatz wird aber dennoch erfüllt, weil die angeregten Atome mit Zwischenschritten über tiefere angeregte Zustände in den Grundzustand zurückkehren können. Im Einzelnen ergibt sich folgender Ablauf: Aus dem Grundzustand erfolgt die Anregung mit der größten Wahrscheinlichkeit in Zustände zwischen 18,3 und 19 eV gegenüber der Energie im Grundzustand. Die Abregung hingegen erfolgt zunächst in Zustände zwischen 16,5 und 16,8 eV und erst von dort weiter in den Grundzustand. Im Ergebnis wird neben sichtbarem Licht zwischen Rot und Gelb (ca. 2 bis 3 eV) UV-Licht im Bereich von 16,5 bis 17 eV emittiert.

A2 FRANCK-HERTZ-VERSUCH

AUFGABEN

1. Aufnahme der Franck-Hertz-Kurve mit Quecksilber und Bestimmung der ersten Anregungsenergie.
2. Aufnahme der Franck-Hertz-Kurve mit Neon und Bestimmung der ersten Anregungsenergie.
3. Beobachtung und Diskussion der an der Neon-Röhre sichtbaren Leuchterscheinung.

VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

Die im Versuch verwendeten Franck-Hertz-Röhren für Hg und Neon enthalten im Unterschied zum in Abb. 2 erläuterten Prinzip ein Vierelektrodensystem, bestehend aus der Katode K, den Gittern G1 und G2 und dem Auffänger A. Abb.3 zeigt den Aufbau und die Beschaltung im Prinzip. Beide Röhren werden über ein gemeinsames Betriebsgerät mit den notwendigen Spannungen versorgt. Am Betriebsgerät befinden sich auch die Buchsen zum Anschluss

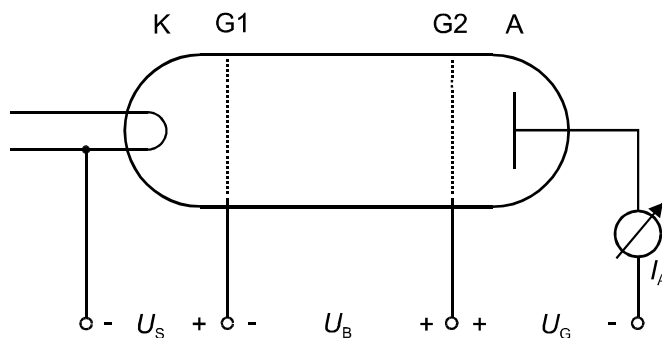


Abb. 3 Beschaltung der Hg- und Ne-Röhren

der Messgeräte für den Auffängerstrom. Im Versuch werden parallel ein X-Y-Schreiber und ein Oszilloskop eingesetzt. Während die Ne-Röhre bei Zimmertemperatur betrieben wird, muss die Hg-Röhre, welche in einem Rohrofen steckt, zur Einstellung des erforderlichen Dampfdruckes hochgeheizt werden. Hierzu wird vom Betriebsgerät die Temperatur der Hg-Röhre ermittelt und die Röhrenheizung und damit der Sättigungsdampfdruck entsprechend

der vorgewählten Solltemperatur nachgeregelt. Für den Versuch ist die Temperatur bereits auf 180 °C voreingestellt, da bei dieser Temperatur eine ausgeprägte Franck-Hertz-Kurve erhalten werden kann.

Die Funktion der Röhren unterscheidet sich nur wenig vom bereits anhand von Abb. 2 erläuterten Prinzip: Die aus einer indirekt geheizten Katode emittierten Elektronen werden von der Saugspannung U_S zum Gitter G1 beschleunigt. Der durch G1 hindurchtretende Emissionsstrom ist von der Beschleunigungsspannung U_B zwischen G1 und G2 praktisch unabhängig (von einem geringen sog. Durchgriff wird dabei abgesehen). Zur Aufnahme der Franck-Hertz-Kurven wird bei fester Saugspannung U_S und Gegenspannung U_G die Beschleunigungsspannung U_B von null beginnend hochgefahren.

Die elektrische Schaltung wird entsprechend den ausführlichen Schaltbildern am Versuchsort aufgebaut. Für Aufgabe 1 ist zu kontrollieren, ob die Hg-Röhre vollständig im Kupferrohr zur Adaptierung an den Durchmesser des Rohrofens steckt und ob die Messspitze des Temperaturfühlers vollständig in das Sackloch im Kupferrohr eingeführt ist (Abb. 4). Nach Einschalten des Betriebsgerätes signalisiert eine rote LED-Anzeige das Aufheizen des Ofens. Die Anzeige leuchtet grün bei Erreichen der Betriebstemperatur von 180°C.

Jetzt wird zunächst das Oszilloskop zur Registrierung der Franck-Hertz-Kurve wie folgt an das Betriebsgerät angeschlossen: An den Y-Eingang wird eine zu I_A proportionale Spannung U_A und an den X-Eingang die Spannung $U_B / 10$ gelegt und der Betriebsartenschalter auf „Sägezahn“ gestellt. Die Beschleunigungsspannung U_B wird automatisch mit einem Sägezahnverlauf auf jeweils ca. 30 V hochgefahren. Anschließend werden die Spannungen U_G und U_S auf etwa 1,5 V voreingestellt und bei Beobachtung des Bildschirms solange

A2 FRANCK-HERTZ-VERSUCH

wechselseitig nachgeregelt, bis sich die typische Franck-Hertz-Kurve als stehendes Bild herausgebildet hat. Die Benutzung des Oszilloskops bietet den Vorteil, dass der Einfluss der Änderung von U_G und U_S unmittelbar verfolgt werden kann.

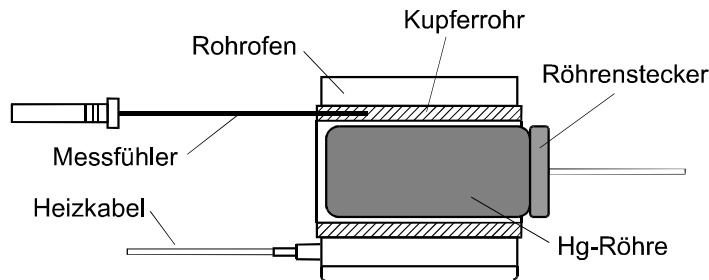


Abb. 4 Rohrofen mit Hg-Röhre und Messfühler

Ist eine optimale Einstellung gefunden, wird parallel zum Oszilloskop ein X-Y-Schreiber angeschlossen. Eine ausführliche Beschreibung des Schreibers mit Betriebsanleitung liegt am Versuchsplatz aus. Zu Beginn muss der Schreiber geeignet einjustiert werden. Folgende Messbereichseinstellungen werden empfohlen:

für U_B auf der X-Achse: VAR, 1V/cm und

für I_A auf der Y-Achse: gleichfalls VAR, 1V/cm.

Anschließend wird der Nullpunkt mit den beiden Knöpfen ($\triangleleft \triangleright$) jeweils etwa 1 cm vom linken bzw. unteren Anschlag eingestellt.

Im Unterschied zur Y-Achse muss die X-Achse auch in Volt kalibriert werden. Dazu wird die X-Empfindlichkeit am stufenlosen Einstellregler links neben dem X-Messbereichsschalter so eingestellt, dass bei $U_B = 30$ V der Ausschlag ca. 2 cm unter dem rechten Anschlag bleibt.

Danach werden bei Beobachtung der U_B -Anzeige auf dem Betriebsgerät Punkte bei 0, 10, 20, und 30 V auf dem Papier markiert, nachdem dieses in der Schalterstellung „CHART“ elektrostatisch auf dem Schreiber fixiert und die Schreibfeder in der Schalterstellung „PEN“ abgesenkt wurde. Vertikale Markierungen lassen sich leicht durch Betätigung des Y-Nullpunktreglers anbringen.

Jetzt wird der Betriebsartenschalter am Betriebsgerät auf „Rampe“ gestellt (U_B wird automatisch in ca. 10 sec auf ca. 30 V hochgefahren) und die Franck-Hertz-Kurve geschrieben.

Eine optimale Einstellung des Y-Ausschlags erreicht man mit dem stufenlosen Empfindlichkeitsregler links neben dem Y-Messbereichsschalter derart, dass der Vollausschlag ca. 5 cm unter dem oberen Anschlag bleibt. Zur weitergehenden Optimierung der Kurve können die Spannungen U_S und U_G geringfügig nachgeregelt werden. Um Papier zu sparen, sollten die Einstellarbeiten bei zunächst noch abgehobener Schreibfeder ausgeführt werden. Erst wenn alles stimmt, wird auf „PEN“ umgeschaltet. Die erste Anregungsenergie des Hg-Atoms kann aus dem Abstand der Maxima der Kurve bestimmt werden.

Für Aufgabe 2 wird die Ne-Röhre anstelle der Hg-Röhre am Betriebsgerät angeschlossen. Das Betriebsgerät erkennt die angeschlossene Röhre selbständig und schaltet automatisch auf den U_B -Bereich von 0 – 80 V um.

Neu einzustellen sind für die Ne-Röhre die Spannungen $U_S \approx 3$ V und $U_G \approx 8$ V und entsprechend der höheren Spannung U_B die Messbereiche an Oszilloskop und Schreiber. Ansonsten wird sinngemäß wie bei Aufgabe 1 verfahren.

Für Aufgabe 3 wird bei abgedunkeltem Raum die mehr oder weniger ausgeprägte Schichtstruktur der rötlichen Leuchterscheinung in Abhängigkeit von U_B im Bereich zwischen den beiden Gittern beobachtet. Hierzu wird der Betriebsartenschalter auf „MAN.“ gestellt und U_B

A2 FRANCK-HERTZ-VERSUCH

langsam von Hand verändert. Bei der Beobachtung bzw. Diskussion ist insbesondere auf den die theoretische Deutung des Franck-Hertz-Versuches nahe liegenden Zusammenhang zwischen dem Auftreten der Leuchterscheinungen und ihrer relativen Lage in der Beschleunigungszone einerseits und dem Verlauf der Franck-Hertz-Kurve andererseits einzugehen. Am besten lässt man den Schreiber bei abgehobener Feder mitlaufen und konzentriert sich darauf, was in der Umgebung der Minima der Kurve geschieht.

FRAGEN

1. Welche Aussagen macht das Bohrsche Atommodell, wie lauten die Bohrschen Postulate?
2. Was bedeuten die Begriffe Grundzustand, angeregter Zustand, Anregungsenergie, Resonanzanregung?
3. Welche unterschiedlichen Stoßprozesse finden in der Franck-Hertz-Röhre statt?
4. Welche Energie kann maximal beim elastischen bzw. unelastischen Stoß übertragen werden?
5. Was versteht man unter dem Begriff Kontaktspannung und wie wirkt sie sich auf die Franck-Hertz-Kurve aus?
6. Wie wirkt sich die Gasdichte auf die Franck-Hertz-Kurve aus?