

4 Anhang: Deutung des Franck-Hertz-Experiments

4.1 Deutung mit Quecksilber

Befindet sich die Franck-Hertz-Röhre im kalten Zustand, so steigt der Strom I_G streng monoton mit der angelegten Beschleunigungsspannung U_B (rote, gestrichelte Kurve in Abb. 4). Dieses Verhalten lässt sich wie folgt verstehen: Die geheizte Kathode emittiert aufgrund des **glühelektrischen Effekts** Elektronen. Diese Elektronen bilden vor der Kathode eine Raumladungswolke. Bei einer kleinen Beschleunigungsspannung nimmt nur ein sehr kleiner Teil der Elektronen aus der Raumladungswolke am Stromtransport teil – die anderen fallen in die Kathode zurück. Die „abgesaugten“ Elektronen werden durch das elektrische Feld beschleunigt und haben anschließend die kinetische Energie $E_{\text{kin}} = e \cdot U_B$. Die Anode besitzt eine Gitterstruktur, die die meisten Elektronen passieren können (sie fliegen durch die Maschen). Die Elektronen, die das Gitter passiert haben, müssen nun durch ein Gegenfeld laufen und werden abgebremst, erreichen bei genügend hoher kinetischer Energie aber schließlich die Gegenelektrode.

Wird die Beschleunigungsspannung weiter erhöht, so werden immer mehr Elektronen aus der Raumladungswolke abgesaugt und gelangen zur Gegenelektrode; der Strom nimmt zu. Das in der Röhre befindliche Quecksilber stört den Prozess nicht, da bei Zimmertemperatur der Quecksilberdampfdruck sehr gering ist (Dampfdruck $p_{\text{Hg}} = 2 \mu\text{bar}$) und es kaum Quecksilberatome gibt, mit denen die Elektronen wechselwirken können.

Die Kurve sieht jedoch völlig anders aus, wenn die Röhre auf eine Temperatur von ca. 180°C aufgeheizt wird. In regelmäßigen Abständen zeigt die Kurve dann Minima und Maxima wie in Abb. 4 dargestellt.

Deutung:

Durch das Aufheizen ist das **Quecksilber** in die Dampfphase übergegangen (Dampfdruck $p_{\text{Hg}} = 20 \text{ mbar}$). Die Wahrscheinlichkeit, dass es zwischen den Elektronen und den Quecksilberatomen zu **Stößen** kommt, ist nun erheblich größer. Bei geringen Beschleunigungsspannungen entspricht der Strom-Spannungsverlauf dem bei Zimmertemperatur, d.h. die Elektronen geben trotz der Stöße keine Energie an die Quecksilberatome ab. Die Quecksilberatome nehmen keine Energie auf, d.h. die **Stöße** sind *elastisch*³.

Bei steigender (Beschleunigungs-)Spannung fällt die Kurve plötzlich stark ab. Dies kann nur so gedeutet werden, dass die Elektronen durch die Stöße Energie verloren haben und nun nicht mehr alle in der Lage sind, die Gegenspannung zu überwinden und zur Gegenelektrode zu gelangen.

Dieses Verhalten ist ein Hinweis auf quantisierte Energiestufen der Elektronen im Quecksilberatom. Erst wenn ein stoßendes Elektron genügend kinetische Energie besitzt, um ein äußeres Elektron im Quecksilberatom energetisch mindestens auf die nächsthöhere Stufe anzuregen, kann es an dieses

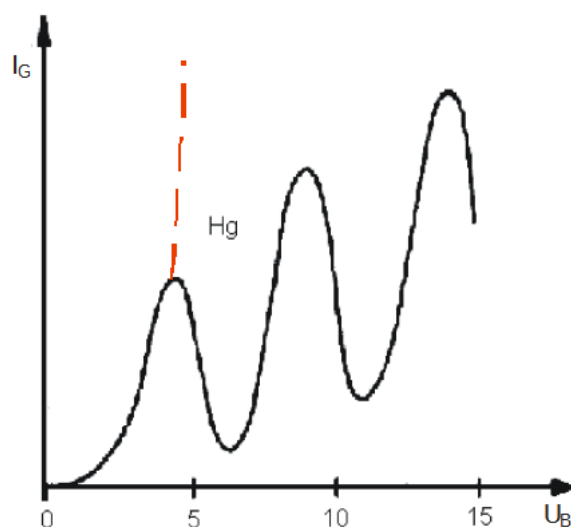


Abbildung 4: Franck-Hertz-Kurve für Quecksilber.

³Ein *elastischer* Stoß ist ein Stoßprozess, bei dem keine kinetische Energie in andere Energieformen umgewandelt wird. Hier bleiben sowohl Bewegungsenergie als auch Impuls erhalten. Ein *inelastischer* Stoß ist ein Stoßprozess, bei dem die kinetische Energie in andere Energieformen umgewandelt wird. Der (Gesamt-)Impuls bleibt jedoch auch hier erhalten.

seine Energie übertragen und der Stoß wird inelastisch.

Ein solcher inelastischer Stoß passiert das erste Mal räumlich direkt vor der Anode, weil die Elektronen auf dem Weg von der Kathode zur Anode kontinuierlich schneller werden. Wird die Beschleunigungsspannung weiter erhöht, so werden solche inelastischen Stöße räumlich bereits vor Erreichen der Anode stattfinden, denn die dafür notwendige Geschwindigkeit wird dann schon vorher erreicht. Die dadurch abgebremsten Elektronen können auf ihrem restlichen Weg zur Anode wieder Energie aus dem elektrischen Feld aufnehmen und die Gegenspannung zwischen Gegenelektrode und Anode überwinden; der Strom I_G steigt wieder an. Der zweite Abfall in der Kurve beginnt bei derjenigen Beschleunigungsspannung, bei der die Elektronen auf ihrem Weg von der Kathode zur Anode die Quecksilberatome zweimal hintereinander anregen können. Die kinetische Energie reicht nun wieder nicht aus, um das Gegenfeld zu überwinden; der Strom beginnt wieder zu fallen.

Mit steigender Beschleunigungsspannung erhöht sich die Stromstärke wieder, bis jeweils weitere inelastische Stöße erfolgen können.

Aufgaben:

1. Überlegen Sie sich *wo* in der Franck-Hertz-Röhre die Stöße der Elektronen mit den Hg-Atomen stattfinden.
Hilfsfragen: Wie nimmt die kinetische Energie der Elektronen im Bereich der Beschleunigungsspannung zwischen Kathode und Anode zu? Wie ist sie z.B. am Anfang, in der Mitte, am Ende?
2. Welche Konsequenz hat eine weitere Erhöhung der Beschleunigungsspannung U_B auf die räumlich Lage der Orte, an denen die Elektronen die Hg-Atome inelastisch stoßen?

4.2 Deutung mit Neon

Grundsätzliche physikalische Unterschiede zum Franck-Hertz-Versuch mit Quecksilber gibt es nicht. Eine Kaltkurve, wie bei Quecksilber, kann nicht aufgenommen werden, weil **Neon** gasförmig ist, so dass die Neonatome immer den stoßenden Elektronen im Weg sind.

Der Stoßmechanismus ist genau der gleiche wie bei Quecksilber. Einziger Unterschied ist die Anregungsenergie von **Neon**. Diese liegt bei ca. 18 V, d.h. erst ab einer kinetischen Energie der stoßenden Elektronen von 18 eV können inelastische Stöße auftreten. Demgemäß liegen im Spannungsbereich bis 80 V weniger Berge und Täler als bei Quecksilber.

Die Stoßzonen sind in der Neon-Franck-Hertz-Röhre gut sichtbar, weil sie auffällig orange-gelb leuchten. Erwarten würde man dies aufgrund des Energieunterschiedes nicht: Der Energieunterschied der beiden Niveaus liegt weit im **ultravioletten** Bereich. Warum trotzdem orange-gelbes Licht zu sehen ist, liegt an den quantenmechanischen Eigenschaften der beiden beteiligten Energieniveaus. Bei Aussenden eines Photons ändert sich nämlich die sogenannte **Drehimpulsquantenzahl** des zurückfallenden Elektrons um Eins. Das bedeutet: Ein Zurückfallen des angeregten Elektrons auf sein ursprüngliches Niveau ist nur dann möglich, wenn sich die Drehimpulsquantenzahlen von angeregtem Niveau und ursprünglichem Niveau **um Eins unterscheiden**. Genau das ist aber bei diesem Übergang in Neon nicht der Fall. Das angeregte Elektron kann also nicht direkt zurückspringen.

Stattdessen fällt es zuerst auf ein Zwischenniveau zurück, das relativ dicht am angeregten Niveau liegt und das eine um Eins unterschiedliche Drehimpulsquantenzahl hat. Die dabei emittierte **elektromagnetische Strahlung** hat dann genau die Wellenlänge orange-gelben Lichts. Von diesem Zwischeniveau kann das Elektron direkt auf sein ursprüngliches Niveau zurückfallen, wobei die dann ausgesandte Strahlung immer noch weit im ultravioletten Bereich des Spektrums liegt.

Wer aufgepasst hat, wird sich jetzt die Frage stellen: Wieso kann das Elektron direkt vom unteren Niveau auf das obere angeregt werden, obwohl es von dort nicht sofort wieder auf das untere Niveau

zurückfallen kann? Schließlich handelt es sich ja um die gleichen Niveaus. Der Grund liegt im Unterschied der beiden Prozesse:

- Bei der Anregung wird das Hüllenelektron von einem äußeren Elektron gestoßen. Dabei kann sich die Drehimpulsquantenzahl ändern, muss es aber nicht. Ein Photon ist hierbei nicht beteiligt.
- Beim Zurückfallen auf das Grundniveau **muss** ein Photon emittiert werden, um die Energie wieder abzugeben. Diese Photonenemission erfordert zwingend eine Änderung der Drehimpulsquantenzahl.

Der Grund liegt also in dem Photon. Gäbe es eine Möglichkeit die Energie abzugeben ohne ein Photon zu emittieren, dann wäre ein direkter Rücksprung möglich.