

<b>A20 Franck–Hertz–Versuch</b>	
Name:	Matrikelnummer:
Fachrichtung:	Versuchsdatum:
Mitarbeiter/in:	Gruppennummer:
Assistent/in:	Endtestat:

Dieser Fragebogen muss von jedem Teilnehmer **eigenständig** (keine Gruppenlösung!) handschriftlich beantwortet und vor Beginn des Versuchs abgegeben werden. Die Vorbereitung wird zusätzlich durch einen Test bzw. eine mündliche Prüfung über die physikalischen Grundlagen des Versuchs kontrolliert.  
(Version: 16. Oktober 2021)

### Versuchsziel und Versuchsmethode:

1.) Erklären Sie das Zustandekommen von Spektrallinien im Bohrschen Atommodell (Skizze).

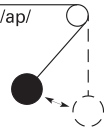
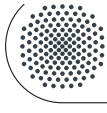
2.) Nennen Sie die Größenordnung der dabei auftretenden Elektronenenergien (in eV).

3.) Nennen Sie mehrere Möglichkeiten, um Elektronen von außen Energie zuzuführen.

4.) Warum ist die absolute Position des ersten Maximums in der Franck–Hertz–Kennlinie zur Bestimmung der Anregungsenergie nicht geeignet?

5.) Wozu dient das Raumladungsgitter  $A_1$  in der Franck–Hertz–Neon Röhre?

6.) Warum wird zwischen der Auffangelektrode und dem Beschleunigungsgitter A bzw.  $A_2$  eine Bremsspannung benötigt?



## A Atomphysik

### A20 Franck–Hertz–Versuch

Diese Anleitung kann und soll kein Lehrbuch ersetzen. Die beschriebenen Grundlagen stellen einen kurzen Überblick dar und sind daher zum Erlernen der physikalischen Grundlagen nicht ausreichend. Genauere Beschreibungen finden sich in:

- [1] FRANCK, J. ; HERTZ, G.: Über Zusammenstöße zwischen Elektronen und den Molekülen des Quecksilberdampfes und die Ionisierungsspannung desselben. In: *Physik Journal* **23** (1967), Nr. 7, S. 294–301. – Wiederveröffentlichung von *Verhandl. d. Dt. Phys. Ges.* **16**, 457 (1914)
- [2] FRANCK, J. ; EINSPOHN, E.: Über die Anregungspotentiale des Quecksilberdampfes. In: *Z. Phys* **2** (1920), S. 18
- [3] *Kapitel 9.3 Gasentladungen.* In: MESCHÉDE, D.: *Gerthsen Physik*. Springer, 2010. – E-Book
- [4] *Kapitel 3.4 Die Quantenstruktur der Atome.* In: DEMTRÖDER, W.: *Experimentalphysik 3: Atome, Moleküle und Festkörper*. Springer, 2016. – E-Book
- [5] *Kapitel 5.7 Vollständige Beschreibung des Wasserstoffatoms.* In: DEMTRÖDER, W.: *Experimentalphysik 3: Atome, Moleküle und Festkörper*. Springer, 2016. – E-Book
- [6] *Kapitel Systeme von Massenpunkten. Stöße.* In: DEMTRÖDER, W.: *Experimentalphysik 1: Mechanik und Wärme*. Springer, 2015. – E-Book
- [7] *Kapitel 2.5 Der elektrische Aufbau von Atomen.* In: DEMTRÖDER, W.: *Experimentalphysik 3: Atome, Moleküle und Festkörper*. Springer, 2016. – E-Book

#### Stichworte

Bohrsche Atomtheorie [4], Linienspektren [4], Termdarstellung [5], Plancksches Wirkungsquantum [4], elastischer und inelastischer Stoß [6], Stoßanregung [7].

#### Grundlagen

Der Franck–Hertz–Versuch ist einer der grundlegenden Versuche zur Quantentheorie. Er erbrachte den Beweis, dass die Energiestufen  $E_n$  der Atome nicht kontinuierlich, sondern diskret sind und dass die Energieaufnahme bzw. –abgabe eines Atoms in Energiequanten  $\Delta E$  erfolgt. Ein Atom vermag von außen zugeführte Energie  $E$  nur dann zu absorbieren, wenn  $E \geq \Delta E = |E_2 - E_1|$  ist, wobei  $E_2$  und  $E_1$  die Energieeigenwerte zweier diskreter Elektronenzustände in der Atomhülle sind.

In der mit Quecksilberdampf bzw. Neongas gefüllten Franck–Hertz–Röhre werden Elektronen beschleunigt. Man beobachtet zwei Arten von Stoßprozessen zwischen Elektronen und Atomen :

1. Ist die Energie  $E$  der stoßenden Elektronen kleiner als  $|E_2 - E_1|$ , so erfolgen elastische Stöße: das Elektron ändert nur seinen Impuls, gibt jedoch keine Energie ab.
2. Überschreitet die Elektronenenergie  $\Delta E$ , so verlieren die Elektronen beim Stoß die Energie  $\Delta E = |E_2 - E_1|$  (beim Hg-Atom etwa 4,9 eV, beim Ne-Atom sind es etwas höhere Energien, die bei etwa 19 eV liegen). Das angeregte Atom emittiert diese Energie nach einer gewissen Zeit wieder in Form elektromagnetischer Strahlung.

### Versuchsbeschreibung

Im Praktikum stehen sowohl eine Quecksilber-, als auch eine Neon-Frank-Hertz-Röhre zur Verfügung. Prinzipiell sind beide gleich aufgebaut (siehe Abb. A20-1), im Folgenden wird aber auch auf die Einzelheiten der Röhren eingegangen.

### Frank-Hertz-Hg-Röhre

Die Frank-Hertz-Hg-Röhre befindet sich in einem Heizofen, um den in der evakuierten Röhre eingeschlossenen Quecksilbertropfen zu erwärmen, und damit eine für den Versuch hinreichende Dampfdichte des Quecksilbers zu erhalten. Außer dem Hg-Tropfen befinden sich in der Röhre drei ebene, parallel angeordnete Elektroden: eine indirekt geheizte Oxidkathode **C** (indirekt, um eine Potentialdifferenz entlang der Kathode zu vermeiden), eine gitterförmige Beschleunigungselektrode **A**, und eine Auffängerelektrode **S**. Der Abstand zwischen Kathode und Gitter ist groß gegenüber der mittleren freien Weglänge der Elektronen im Hg-Dampf bei Betriebstemperatur, damit eine möglichst hohe Stoßwahrscheinlichkeit erzielt wird; der Abstand zwischen Gitter und Auffängerelektrode ist dagegen klein gehalten. In die Gitterzuleitung ist ein Schutzwiderstand eingebaut.

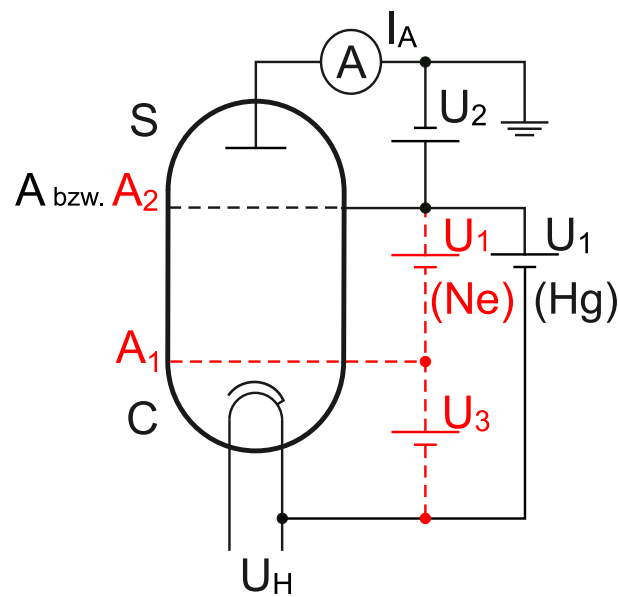


Abb. A20-1: Franck–Hertz–Röhre: schematische Versuchsanordnung, Dreielektrodensystem in einer Quecksilber-Röhre bzw. Vierelektrodensystem in einer Neon-Röhre; **C** indirekt geheizte Kathode, **A** (bei Ne: **A<sub>1</sub>** und **A<sub>2</sub>**) gitterförmige Beschleunigungselektrode(n), **S** Auffängerelektrode,  $U_H$  Heizspannung,  $U_1$  (bei Ne:  $U_1$  und  $U_3$ ) variable Beschleunigungsspannung(en),  $U_2$  Gegenspannung,  $I_A$  Auffängerstrom

Die aus der Kathode austretenden Elektronen bilden eine Raumladungswolke. Durch eine variable Spannung  $U_1$  werden die Elektronen von der Kathode **C** zum Gitter **A** hin beschleunigt, das als Anode wirkt. Nach Durchfliegen des Gitters werden sie durch eine Gegenspannung  $U_2$ , die zwischen dem Gitter und dem Auffänger **S** liegt, wieder abgebremst. Nur solche Elektronen, deren kinetische Energie am Gitter größer als  $eU_2$  ist, treffen auf den Auffänger und können als Auffängerstrom  $I_A$  nachgewiesen werden.

Auf ihrem Weg von der Kathode zur Anode können die Elektronen mit Hg-Atomen stoßen, wobei die Stoßwahrscheinlichkeit von der Anzahldichte der Hg-Atome abhängt. Abhängig von der Energie der Elektronen sind diese Stöße nur elastisch oder auch unelastisch (d.h. mit einer Anregung der Atomhülle oder gar einer Ionisierung). Bei einem elastischen Stoß ist der Energieverlust des Elektrons sehr gering, bei einem unelastischen Stoß gibt das Elektron die Anregungsenergie an das Atom ab und behält die Restenergie. Jenseits der Anode befindet sich der gegenüber der Anode negative Auffänger **S**. Ist die kinetische Energie der Elektronen, die durch das Beschleunigungsgitter (die Anode) hindurch fliegen, groß genug zum Überwinden des Gegenfeldes, werden diese Elektronen als Strom  $I_A$  in der Auffängerzuleitung nachgewiesen. Ist ihre Energie zu klein, so fließen sie nach Umkehr im Gegenfeld über die Anodenzuleitung ab. Durch das Gegenfeld (Gegenspannung  $U_2$ ) kann man also die langsamen Elektronen, die davor evtl. elastisch an Hg-Atomen gestreut wurden, ausfiltern, und damit das Verhältnis von maximalem zu minimalem Auffängerstrom  $I_A$  erhöhen - d.h. den Kontrast der Frank-Hertz-Kurve verbessern.

Der Auffängerstrom  $I_A$  ist ein Maß für die Anzahl der Elektronen, die das Gitter **A** passieren und so über den Auffänger **S** abfließen. In Abhängigkeit von der Beschleunigungsspannung  $U_1$  wird der Auffängerstrom  $I_A$  gemessen.

Als Messergebnis (vgl. Abb. A20-2) erhält man mit steigender Beschleunigungsspannung zunächst einen steigenden Auffängerstrom. Ab einer bestimmten Spannung verflacht der Anstieg und dann nimmt der Auffängerstrom  $I_A$  drastisch ab. Die Elektronenenergie hat die kleinste Anregungsenergie (bei Hg 4,89 eV) überschritten und mit zunehmender Spannung wird die Zone vor der Anode, in der unelastische Stöße möglich sind, breiter. Dabei verschiebt sich diese Wechselwirkungszone mit steigender Beschleunigungsspannung  $U_2$  zur Kathode und es folgt ein zweites, drittes usw. Maximum des Auffängerstroms  $I_A$ . Aus dem Abstand aufeinanderfolgender Maxima lässt sich die Anregungsenergie der Quecksilberatome sehr genau bestimmen.

Neben der historischen Bedeutung bietet das mit Quecksilber gefüllte Franck–Hertz–Rohr auch experimentelle Vorteile. Der erste angeregte Zustand liegt für Quecksilber bei etwa 5 eV - d.h. es können mit relativ geringen Beschleunigungsspannungen von nur 0 V bis 30 V bis zu 6 Maxima in der Elektronenstoßkurve beobachtet werden.

## Frank-Hertz-Ne-Röhre

Die Frank-Hertz-Neon Röhre ist im wesentlichen gleich wie die Hg-Röhre aufgebaut. Man beachte folgende Unterschiede:

- es ist keine Heizung notwendig. Ein Gasdruck von etwa 10 hPa, der für eine ausreichende Stoßwahrscheinlichkeit der Ne-Atome mit den Elektronen genügt, ist schon bei Raumtemperatur vorhanden.
- in der Röhre befindet sich eine zusätzliche Beschleunigungselektrode **A<sub>1</sub>**, an der die sog. Steuerspannung von  $U_3 = (3 \pm 1)$  V angelegt wird.
- in Ne-Atomen werden andere Energiezustände angeregt, daraus resultiert eine Frank-Hertz-Kurve, bei welcher die Extrema bei anderen Beschleunigungsspannungen zu finden sind
- die Abregung dieser Zustände erfolgt unter Emission von Photonen, deren Wellenlänge im sichtbaren orangeroten Bereich liegt und die deshalb mit bloßem Auge beobachtet werden können (vgl. Abb. A20-3).

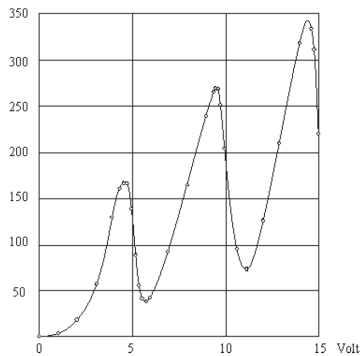


Abb. A20-2: Typische Frank-Hertz-Kurve: Anodenstrom als Funktion der Beschleunigungsspannung in einer Hg-Röhre



Abb. A20-3: Typische Leuchtschichten, die beim Frank-Hertz-Experiment mit einer Ne-Röhre beobachtet werden können

## Versuchsaufbau

Die Messungen sind sowohl an einer Hg- als auch einer Ne-Röhre durchzuführen. Beginnen Sie mit dem Aufbau an dem Ihnen zugeteilten Versuchsplatz und tauschen Sie nach Beendigung der Messung die Plätze mit Ihrer Nachbargruppe.

1. Die Röhre ist mittels eines Verbindungskabels an das Betriebsgerät angeschlossen, damit können alle an der Röhre anliegenden Spannungen angesteuert werden. Der gemessene Anodenstrom wird über ein BNC-Kabel an das Betriebsgerät zum Auslesen geschickt. In der Hg-Röhre ist zusätzlich ein Thermoelement mit dem Betriebsgerät verbunden. Alle Signale können sowohl manuell über das Betriebsgerät, als auch über PC angesteuert und abgelesen werden. Dazu kann das Betriebsgerät über ein RS-232-Kabel an Computer angeschlossen werden. Eine Software erlaubt die Ansteuerung des Betriebsgeräts, außerdem ist eine Erfassung und Auswertung aller Messwerte möglich.
2. Überprüfen Sie, ob alle Komponenten richtig verbunden sind (vgl. Abb. in der Anleitung am Messplatz bzw. vom Assistent überprüfen lassen). Mittels Netzschalter Betriebsgerät einschalten.
3. Machen Sie sich kurz mit den Funktionen des Betriebsgeräts sowie mit der manuellen Ansteuerung einzelner Parameter vertraut. Stellen Sie bei der Hg-Röhre die Solltemperatur des Heizofens auf 175 °C und schalten Sie den Ofen ein. Die Aufwärmzeit beträgt ca. 10 Minuten.
4. Stellen Sie auf dem Betriebsgerät mit dem Tastschalter "PC" ein. Fahren Sie den Rechner hoch. Starten Sie das Programm *Measure* und rufen Sie das Frank-Hertz-Messprogramm auf. Das Programm erkennt automatisch, ob ein Hg- oder ein Ne-Rohr angeschlossen ist. Die notwendigen Parameter sind voreingestellt.

5. Über die Software können alle Parameter geändert werden. Sie erlaubt es die Beschleunigungsspannung sowohl automatisch („automatische Rampe“), als auch manuell durchzufahren.

### Messprogramm

1. Hg-Röhre: Untersuchen Sie, wie sich der Hg-Dampfdruck bei 3 verschiedenen Temperaturen, gewählt im Bereich von  $(175 \pm 10)^\circ\text{C}$ , auf die Form der Strom-Spannungskennlinie auswirkt.
2. Optimieren Sie die Parameter für Gegenspannung  $U_2$  und beim Ne-Rohr auch für die Saugspannung  $U_3$ , damit eine möglichst kontrastreiche Franck-Hertz-Kurve mit möglichst vielen ausgeprägten Minima und Maxima entsteht. Die Kurve soll auch bei höheren Beschleunigungsspannungen im Messbereich liegen und darf nicht „abgeschnitten“ werden. Nehmen Sie eine entsprechende Kurve auf. Notieren und erklären Sie die Zusammenhänge, die die Form und Qualität der Kurve beeinflussen.
3. Bestimmen Sie die Anregungsenergie der Resonanzlinie des Hg- bzw. des Ne-Atoms aus der aufgenommenen Kurve. Schätzen Sie den dabei entstehenden Fehler ab. Berechnen Sie daraus die Wellenlänge des Lichts, das einem direkten Übergang in den Grundzustand entspräche.
4. Ne-Röhre: Beobachten Sie die in der Röhre entstehenden Leuchtschichten. Zeigen Sie, dass es sich dabei nicht um einen direkten Übergang vom angeregten in den Grundzustand handeln kann, indem Sie die von Elektronen abgegebene Energie mit der Energie dieser im sichtbaren Spektralbereich emittierten Photonen vergleichen! Wie hängt deren Anzahl bzw. Position in der Röhre von der angelegten Beschleunigungsspannung ab?

### Hinweise

- Es ist während des ganzen Versuchs darauf zu achten, dass das metallische Quecksilber keinen Kurzschluss verursacht. Deshalb dürfen auch keine Betriebsspannungen an ein kaltes Rohr gelegt werden.
- Das Franck-Hertz-Rohr ist ein Vakuumrohr mit ca. 5 g Hg-Füllung, dessen Giftigkeit bekannt ist. Bei Stoß kann das Rohr implodieren.
- Das Ofen-Gehäuse beim Hg-Rohr wird auch außen während des Betriebs heiß!
- Wenn der Auffängerstrom zu hoch ist (beim Zünden), dann wird die Messung durch das Franck-Hertz-Betriebsgerät nach 7 s unterbrochen, um die Röhre vor Beschädigungen zu schützen. Um das Zünden des Rohres zu vermeiden, verändern Sie die Parameter  $U_2$ ,  $U_3$  und  $U_H$  wie folgt: reduzieren Sie die Kathodenheizspannung  $U_H$  und reduzieren Sie  $U_3$ .



- Folgende Parameter dürfen eingestellt werden:

Parameter	Hg-Röhre	Ne-Röhre
$T_{\text{nom}}$	$(175 \pm 10) \text{ }^\circ\text{C}$	-
$U_{\text{H}}$	$(6,3 \pm 0,5) \text{ V}$	$(7,5 \pm 0,5) \text{ V}$
$U_1$	0 ... 60 V	0 ... 99,9 V
$U_2$	$(2,0 \pm 0,5) \text{ V}$	$(8 \pm 1) \text{ V}$
$U_3$	-	$(3 \pm 1) \text{ V}$

- Die Anregungsenergien erhalten Sie, indem Sie den Mittelwert der aus jeweils zwei benachbarten Maxima sich ergebenden Spannungsdifferenzen  $\Delta U_1$  ermitteln. Mittels der *Measure*-Software kann man dazu über die „Messauswertung“ mit der Funktion „Kurvenanalyse“ die Hoch- sowie Tiefpunkte der aufgenommenen Kurve berechnen lassen.
- $h = 4,14 \cdot 10^{-15} \text{ eV s}$ ,  $c = 2,9979 \cdot 10^8 \text{ m/s}$