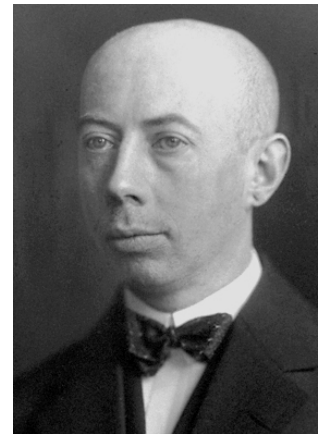




James Franck
(* 1882 in Hamburg,
† 1964 in Göttingen)



Gustav Hertz
(* 1887 in Hamburg,
† 1975 in Ost-Berlin)

Ist Energie kontinuierlich ?
Das Franck-Hertz-Experiment
(Quecksilber)

15. September 2017

Inhaltsverzeichnis

1 Was versteht man unter dem Franck-Hertz-Experiment?	2
1.1 Historischer Hintergrund	2
1.2 Prinzipieller Versuchsaufbau	2
1.2.1 Der klassische Aufbau mit Quecksilber	2
2 Experimente	3
2.1 Das Franck-Hertz-Experiment mit Quecksilber	3
2.1.1 Versuchsaufbau	3
2.1.2 Quantitative Aufnahme der Kurve. Berechnung der Frequenz und der Wellenlänge des Überganges	3
3 Quellen	5
4 Anhang: Deutung des Franck-Hertz-Experiments	6
4.1 Deutung mit Quecksilber	6
4.2 Deutung mit Neon	7

1 Was versteht man unter dem Franck-Hertz-Experiment?

1.1 Historischer Hintergrund

Gegen Ende des 19. Jahrhunderts waren viele Wissenschaftler davon überzeugt, dass die Physik als Wissenschaft fast abgeschlossen war. Der große Erfolg der **Newtonschen Mechanik** und der **Maxwell'schen Theorie des Elektromagnetismus** veranlasste sie zu dem Glauben, praktisch alle fundamentalen physikalischen Phänomene deuten zu können. Die Hauptaufgabe der kommenden Physikergenerationen sah man darin, komplexe Probleme zu lösen und die Messgenauigkeit weiter zu verbessern. Das Finden wirklich neuer Erkenntnisse wurde nicht erwartet. Es sollte jedoch ganz anders kommen:

Zwei Experimente erschütterten die Grundfeste der klassischen Physik und ließen sich mit den bekannten physikalischen Modellen trotz größter Anstrengungen nicht deuten. Sie lieferten die Grundlage für zwei ganz neue physikalische Bereiche: Die **Quantenphysik** und die **Relativitätstheorie**.

Das erste dieser Experimente war das **Michelson-Morley-Experiment** mit dem die Existenz des **Lichtäthers** nachgewiesen werden sollte¹. Das Experiment fiel negativ aus, d.h. man fand keine Hinweise auf die Existenz eines solchen Äthers. Als eine Folgerung hieraus ergab sich, dass sich Licht unabhängig von der Bewegung der Lichtquelle in alle Raumrichtungen gleich schnell ausbreitet – ein Vorgang, der dem Verhalten anderer Wellen völlig widersprach und zu scheinbar unglaublichen Konsequenzen führte, die **Albert Einstein** in seiner 1905 veröffentlichten „speziellen **Relativitätstheorie**“ darlegte.

Das zweite Experiment kam aus der **Thermodynamik**. Ende des 19. Jahrhunderts wurden **Spektren** untersucht, die von **glühenden Körpern** ausgesendet werden. Deren Verlauf konnte mit der klassischen Physik nicht gedeutet werden. Nur mit der radikalen Annahme, dass Energie von der **elektromagnetischen Strahlung** nicht kontinuierlich, sondern quantisiert, d.h. in kleinen diskreten „Energieportionen“, den so genannten **Photonen**, übertragen wird, konnte **Max Planck** 1900 die Entstehung der Spektren erklären. Dies war die Geburt der **Quantenphysik**. Mit der in den Folgejahren immer weiter entwickelten Quantentheorie konnte man viele Eigenschaften der Atome sehr gut erklären. Ein grundlegendes Experiment zum Nachweis **diskreter Energiestufen in Atomen** wurde 1913 von **James Franck** und **Gustav Hertz** durchgeführt. Sie wiesen erstmalig nach, dass Atome beim Zusammenstoß mit beschleunigten Elektronen nur diskrete Energiequanten aufnehmen können (→ **Physiknobelpreis 1925**). Dieses als **Franck-Hertz-Versuch** bekannt gewordene Experiment wird im Folgenden beschrieben.

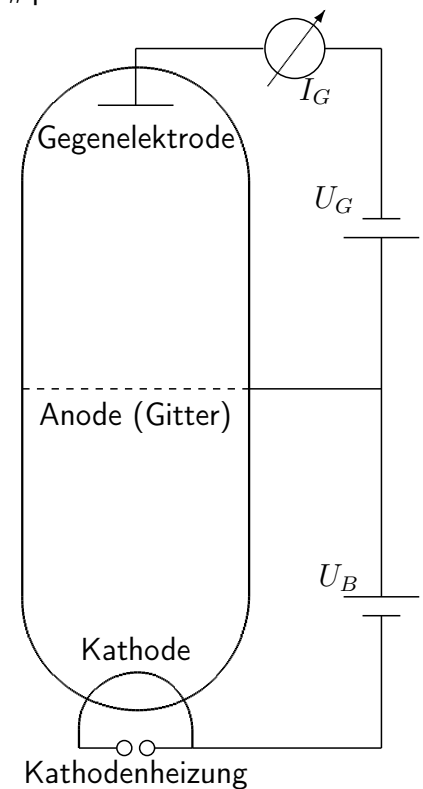


Abbildung 1: Schaltbild des Franck-Hertz-Versuchs mit Quecksilber.

1.2 Prinzipieller Versuchsaufbau

1.2.1 Der klassische Aufbau mit Quecksilber

Beim Franck-Hertz-Versuch werden Elektronen beschleunigt, um sie mit anderen Atomen zusammenstoßen zu lassen. In seiner klassischen Form handelte es sich bei diesen Atomen um Quecksilber. Gern werden aber auch Neonatome dafür benutzt. Beide Versuchsaufbauten sind bei uns vorhanden.

Kernstück des Versuchs ist die Franck-Hertz-Röhre: Es handelt dabei sich um einen evakuierten Glaskolben, in dem die Stoßprozesse ablaufen. Darin befinden sich eine Elektronenerzeugungs- und Beschleunigungseinrichtung sowie das Element, (d.h. Quecksilber oder Neon), mit dessen Atomen

¹Man nahm an, dass Licht – wie jede andere damals bekannte Welle – ein Trägermedium bräuchte, um sich räumlich auszubreiten. Dieses Trägermedium nannte man den „Äther“. (Nicht zu verwechseln mit der chemischen Substanz!)

diese Elektronen zusammenstoßen sollen. Wenn sie *Quecksilber* enthält, befindet sich die Röhre in einem Ofen. Sie besteht aus einem evakuierten Glasgefäß, in das eine **Kathode**, eine **Anode** und eine Gegenelektrode eingelassen sind. Am Boden des Gefäßes befindet sich etwas flüssiges Quecksilber. Die Röhre wird in ihrem Ofen elektrisch erhitzt, so dass ein Teil des Quecksilbers verdampft².

Die Kathode wird durch einen elektrischen Stromfluss erhitzt, bis sie durch **Glühemission Elektronen** freisetzt. Diese werden durch die zwischen **Kathode** und **Anode** anliegende (Beschleunigungs-) Spannung U_B beschleunigt. Zwischen Anode und Gegenelektrode liegt die (Gegen-)Spannung U_G an. Diese ist betragsmäßig kleiner als die Beschleunigungsspannung und wirkt zu ihr entgegengesetzt, d.h. die Elektronen werden beim Durchlaufen dieses Wegstückes abgebremst.

Gemessen wird die Stromstärke I_G in Abhängigkeit von der Beschleunigungsspannung U_B . Die maximale Beschleunigungsspannung beträgt etwa 30 V.

2 Experimente

2.1 Das Franck-Hertz-Experiment mit **Quecksilber**

2.1.1 Versuchsaufbau

Unser Versuchsaufbau besteht aus einer beheizbaren Röhre, einem Betriebsgerät und einem *xy*-Schreiber („**Stiftplotter**“). Das Betriebsgerät ist speziell auf diesen Versuch abgestimmt und hat eine nahezu selbsterklärende Verkabelung – allerdings auch einen gewissen „Black-Box-Charakter“. Es enthält einen Wandler, der die Stromstärke in eine hierzu proportionale Spannung umwandelt, weil die *xy*-Schreiber nur mit Spannungen angesteuert werden können.

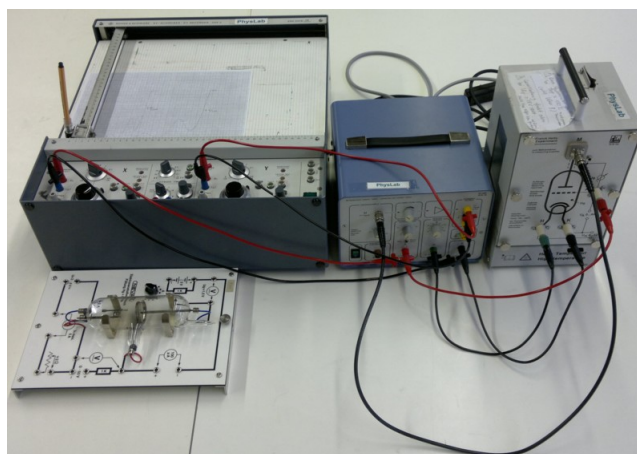


Abbildung 2: Aufbau des Franck-Hertz-Versuchs mit Quecksilber.

2.1.2 Quantitative Aufnahme der Kurve. Berechnung der Frequenz und der Wellenlänge des Überganges

Aufbau und Durchführung:

- Bauen Sie das Experiment gemäß Abb. 3 auf .
- Schalten Sie das **Betriebsgerät** ein und nehmen sie daran folgende Einstellungen vor:
 - Prüfen Sie, ob der Modus „Manuell“ oder „Ramp“ eingeschaltet ist. Sollte „Ramp“ eingeschaltet sein, schalten sie ihn auf „Manuell“.
 - Stellen Sie die Heizspannung (für die **Glühemission**) auf 5,5 V–8 V. **Hinweis:** Eine Spannung im niedrigeren Bereich dieses Intervalls liefert bessere Ergebnisse. Wählen Sie höhere Spannungen nur, wenn das Signal zu schwach ist.
 - Stellen Sie für den Anfang die Beschleunigungsspannung U_B auf 0 V.
 - Das Signal von der Gegenelektrode ist sehr schwach und muss mit einem Messverstärker (der im Betriebsgerät integriert ist) verstärkt werden. Stellen Sie hierfür eine geeignete (i.d.R. mittlere) Verstärkung am Drehknopf neben/im Dreieckssymbol ein !
 - Stellen Sie eine Gegenspannung von 1,5 V–2 V ein !

²Das Quecksilber und der äußere Ofen sind in der Abbildung nicht eingezeichnet. Der nötige Quecksilberdampfdruck beträgt etwa 0,02 bar (= 20 hPa).

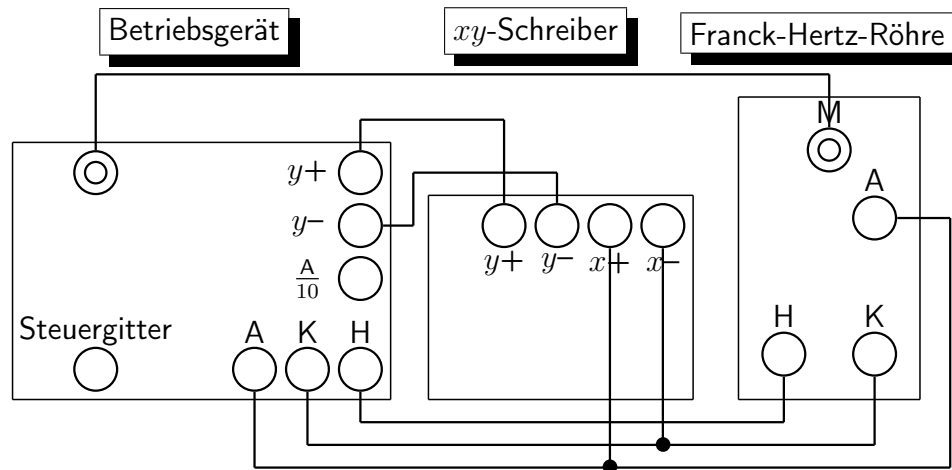


Abbildung 3: Verkabelungsskizze für den Franck-Hertz-Versuch mit Quecksilber. Beachten Sie, dass wir 2 unterschiedliche Betriebsgerätetypen haben, von denen nur der eine hier abgebildet ist. Der andere Typ unterscheidet sich aber nur in der Anordnung der Anschlüsse.

- Schalten Sie den xy -Schreiber ein und stellen Sie seine Empfindlichkeit für x und y auf 1 V/cm. Diese Werte müssen Sie später i.d.R. nachjustieren.

Aufgaben:

1. Legen Sie ein leeres Blatt in den xy -Schreiber ein und erhöhen Sie langsam die Beschleunigungsspannung. Der xy -Schreiber zeichnet eine Kurve. Verändern Sie die Einstellungen des xy -Schreibers ggf. so lange, bis die Kurve das Papier optimal ausnutzt. Legen Sie dann Millimeterpapier ein und zeichnen darauf die Reinschrift der Kurve.
2. Heizen Sie jetzt die Röhre auf ca. 180 – 230⁰C auf, je nach Gerät. Orientieren Sie sich dafür an der Gerätebeschriftung. Legen Sie ein leeres Blatt ein, erhöhen Sie die Beschleunigungsspannung langsam und zeichnen Sie erneut eine Kurve auf. Verändern Sie die Einstellungen des xy -Schreibers erneut ggf. so lange, bis die Kurve das Papier optimal ausnutzt. Legen Sie dann Millimeterpapier ein und zeichnen darauf die Reinschrift der Kurve.

Technische Hinweise: Erscheinen nur 2 Maxima dann müssen Sie weiter heizen, denn es ist noch nicht genügend Hg verdampft. Es hilft hier auch, die Heizspannung auf Werte nahe oberhalb von 5 V zu verringern. Mit zunehmender Hg-Konzentration und Temperatur wird der vertikale Ausschlag immer niedriger, so dass Sie normalerweise die y -Empfindlichkeit am xy -Schreiber deutlich erhöhen müssen (von 1 V/cm auf 0,1 V/cm).

3. Werten Sie die beiden aufgezeichneten Kurven hinsichtlich der Beschleunigungsspannung qualitativ (also was physikalisch passiert) und quantitativ aus.

Auswertung:

Vor Ihnen liegt jetzt eine Kurve mit Maxima und Minima. Bestimmen Sie die kinetische Energie der beschleunigten Elektronen an den Maxima und den Minima, sowie die Energieunterschiede je zweier benachbarter Maxima und Minima.

Die Energiedifferenzen berechnen sich nach der Formel $\Delta E = q \cdot \Delta U$. Da die Ladungsträger einzelne Elektronen sind (also $q = 1e$, mit $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ C), bietet es sich hier an, die Energieeinheit „Elektronenvolt“ (eV) zu benutzen: Durchläuft ein Elektron eine Spannungsdifferenz von 1 V, so hat es eine kinetische Energie von 1 eV ($= 1,602 \cdot 10^{-19}$ J). Mit dieser Einheit sparen Sie sich die Umrechnung in Joule, weil Sie die Zahlenwerte der gemessenen Spannungsdifferenzen

direkt als Energiewerte benutzen können.

Von der Franck-Hertz-Röhre wird **elektromagnetische Strahlung** emittiert. Deren **Frequenz** und **Wellenlänge** ergibt sich aus den Energiedifferenzen zweier benachbarter Maxima (oder Minima) durch die Beziehungen³:

$$\Delta E = h \cdot f \Leftrightarrow f = \frac{\Delta E}{h} \text{ mit } h = 4,14 \cdot 10^{-15} \text{ eV s bzw. } h \approx 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$$

$$c = \lambda \cdot f \Leftrightarrow \lambda = \frac{c}{f} \text{ mit } c \approx 3,0 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

Aufgabe:

Berechnen Sie **Frequenz** und **Wellenlänge** der emittierten Strahlung! Ordnen Sie diese ein: Handelt es sich um **sichtbares Licht**? **Infrarotlicht**? **UV-Licht**?

Raum für Antworten und Rechnungen:

3 Quellen

- **Bilder auf der Titelseite:**

Links: James Franck, Wikimedia Commons, Copyright aus dem Nachlass von Friedrich Hund, im Besitz von Gerhard Hund.

Rechts: Gustav Hertz, Wikimedia Commons, public domain Fotografie.

- Eichler, Kronfeldt, Sahn; Das Neue Physikalische Grundpraktikum, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2001
- Kuhn; Handbuch der experimentellen Physik (Sek. II), Band 8: Atome und Quanten, Aulis Verlag Deubner & Co KG, Köln 1996
- Robert E. Robson, Malte Hildebrandt und Ronald D. White; Ein Grundstein der Atomphysik, Physik Journal 13 (2014) Nr. 3, Seite 43

³Man bezeichnet h als „Plancksches Wirkungsquantum“ oder „Planck-Konstante“. Der Buchstabe c steht für die (Vakuum-)Lichtgeschwindigkeit.

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*⁴.

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

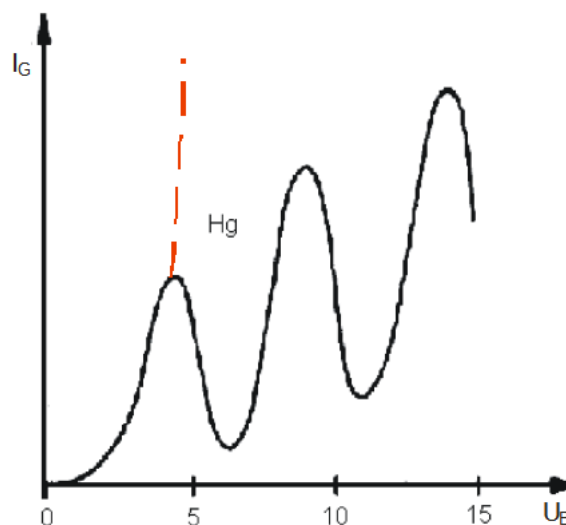


Abbildung 4: Franck-Hertz-Kurve für Quecksilber.

⁴Ein *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:

- 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?
- 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.