

VERSUCHSBERICHT ZU  
A2 – FRANCK-HERTZ-VERSUCH

Gruppe Mi 11

Alex Oster(a\_oste16@uni-muenster.de)  
Jonathan Sigrist(j\_sigr01@uni-muenster.de)

durchgeführt am 25.04.2018  
betreut von  
Marcel Holtmann

2. Mai 2018

# **Inhaltsverzeichnis**

<b>1 Kurzfassung</b>	<b>1</b>
<b>2 Methoden</b>	<b>1</b>
2.1 Aufbau . . . . .	1
2.2 Unsicherheiten . . . . .	2
<b>3 Durchführung und Datenanalyse</b>	<b>3</b>
<b>4 Diskussion</b>	<b>6</b>
<b>5 Schlussfolgerung</b>	<b>8</b>
<b>6 Anhang</b>	<b>9</b>
6.1 Unsicherheitsrechnung . . . . .	9
6.2 Oszilloskopkurven . . . . .	9
<b>Literatur</b>	<b>11</b>

## 1 Kurzfassung

Dieser Bericht beschäftigt sich mit der Untersuchung des Franck-Hertz-Versuches. Er dient zur Beschreibung der Gesetzmäßigkeiten bei Elektronenstößen an Atomen. Das Ziel dieser Arbeit ist es, den Befund von J. Franck und G. Hertz bezüglich dieser Gesetzmäßigkeiten zu unterstützen. Dazu wird der Versuch mit zwei verschiedenen Franck-Hertz-Röhren nachgestellt. Bei diesen handelt es sich um Trioden, welche mit Neon bzw. Quecksilber gefüllt sind.

Wie zu erwarten, hatten die in diesem Versuch aufgenommenen Kennlinien den charakteristischen Verlauf einer Franck-Hertz-Kurve. Des Weiteren entsprechen die Ergebnisse in guter Näherung den Literaturwerten, abgesehen von den berechneten freien Weglängen, welche deutlich über den erwarteten Werten lagen.

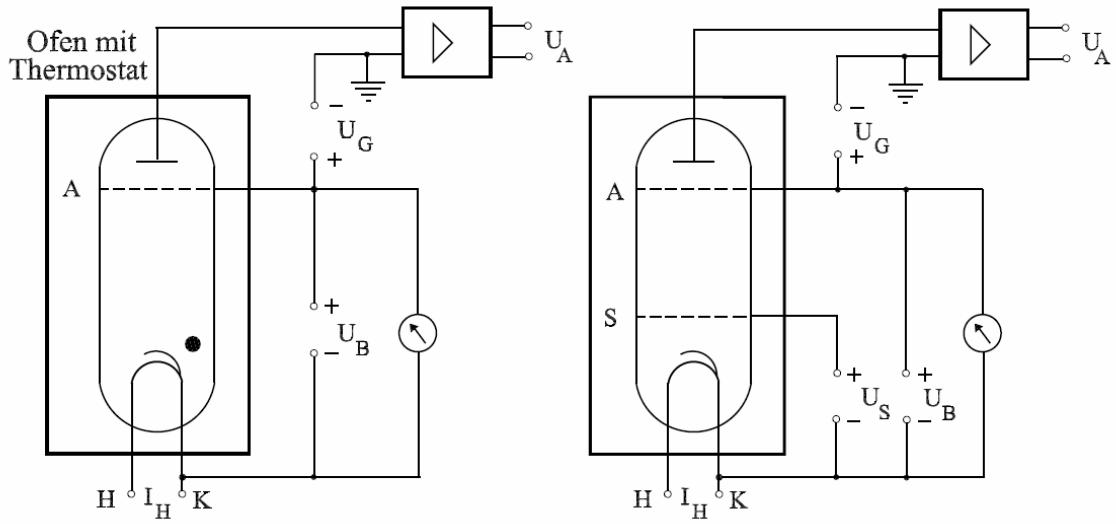
## 2 Methoden

Dieser Abschnitt befasst sich mit dem Aufbau des Franck-Hertz-Versuches, so wie auch den dabei auftretenden Unsicherheiten.

### 2.1 Aufbau

Wie in Abbildung 1 dargestellt, besteht der Aufbau des Franck-Hertz-Versuches im Wesentlichen aus einer Triode, welche mit einem Neongas bzw. flüssigem Quecksilber gefüllt ist. Aus der Kathode werden Elektronen gelöst und zur Anode geschickt. Vor dem Gitter, welches zwischen Kathode und Anode liegt, werden diese mit der Beschleunigungsspannung  $U_B$  beschleunigt und hinter dem Gitter mit der Gegenspannung  $U_G$  abgebremst. Bei der Neonröhre ist hinter der Kathode zusätzlich ein Steuergitter, um mit der Spannung  $U_S$  die Raumladung in Kathodennähe zu verringern, sodass der Elektronenaustritt nicht verhindert wird.

Da der elektrische Strom an der Anode sehr gering ist, wird stattdessen die dazu proportionale anliegende Spannung gemessen. Diese wird über Operationsverstärker im



**Abbildung 1:** Diese Abbildung stellt die Schaltung der Franck-Hertz-Röhren (Hg links, Ne rechts) dar. [3]

Betriebsgerät verstärkt und ist einfacher zu messen.

Für das Quecksilber werden zwei Messungen durchgeführt. Zum einen bei Zimmertemperatur, wo sich das Quecksilber größtenteils im flüssigem Zustand befindet, zum anderen bei deutlich erhöhter Temperatur, wo der Dampfdruck höher ist. Um das Quecksilber zu erhitzen, befindet sich die Quecksilberröhre in einem Ofen, der auf ca. 200 °C erhitzt wird. Ein hoher Druck ist notwendig um eine Reihe von Elektronenstößen an den Atomen zu ermöglichen, welche die zu messende Charakteristiken ausmachen.

## 2.2 Unsicherheiten

Jegliche Unsicherheiten werden nach GUM bestimmt und berechnet<sup>1</sup>. Bei der Rechnung mit Werten mit Unsicherheiten wurde die Python Bibliothek „uncertainties“ herangezogen, welche ihrerseits nach obigen Regeln rechnet.

Für digitale Messungen wird eine Unsicherheit von  $u(X) = \frac{\Delta X}{\sqrt{3}}$ , bei analogen Messungen eine von  $u(X) = \frac{\Delta X}{\sqrt{6}}$  angenommen.

Bei diesem Versuch treten die Unsicherheiten primär bei den Digitalanzeigen der Messgeräte für Spannung und Temperatur auf.

<sup>1</sup>Die Gleichungen dazu finden sich im Anhang unter 4, 5.

Die Beschleunigungsspannung wird analog eingestellt und mit einem digitalen Multimeter gemessen ( $\Delta U = 0,01 \text{ V}$ ).

Der Anodenstrom ist proportional zu der am Ausgang des Betriebsgerätes anliegenden Spannung. Diese wird ebenfalls mit einem digitalen Multimeter gemessen ( $\Delta U = 0,1 \text{ V}, 1 \text{ V}$ ). Dabei ist der benutzte Wertebereich in der Messung berücksichtigt.

Die Temperatur im Ofen wurde mit Hilfe eines digitalen Thermometers gemessen. Da die Temperatur im Ofen Schwankungen unterlag, wird die Unsicherheit etwas größer gewählt ( $\Delta T = 5 \text{ K}$ ).

Die Minima und Maxima der Beschleunigungsspannung wurden aus den Daten gelesen und dementsprechend bewertet ( $\Delta U = 0,5 \text{ V}$ ).

Die Unsicherheiten von Konstanten und stoffspezifischen Eigenschaften, sowie dessen Quelle werden bei Bedarf angegeben.

### 3 Durchführung und Datenanalyse

Vor der Aufnahme der Messungen wurde der Aufbau an ein Oszilloskop angeschlossen, um den Verlauf der Franck-Hertz-Kurven zu verbildlichen (siehe Abb. 6 und Folgende im Anhang). Für eine optimale Aufnahme der  $I_A/U_B$ -Charakteristiken wurde mit Hilfe des Oszilloskop die Gegenspannung  $U_G$  gesucht, bei der die Charakteristiken am deutlichsten erkennbar waren. Diese Gegenspannung lag bei  $U_G \approx 1 \text{ V}$ .

Während der Aufnahme der Werte war bei der Neonröhre ein rötliches Leuchten zu erkennen, welches mit steigender Beschleunigungsspannung  $U_B$  intensiver wurde. Dies ist auf Elektronenstöße zurückzuführen. Je nachdem wie viel Energie ein Elektron besitzt, führt es (in)elastische Stöße mit den Atomen des Gases aus. Hat es genug Energie um das Atom anzuregen, so gibt es diese an das Atom ab. Nachdem das Atom angeregt wurde, fällt es schnell in seinen Grundzustand zurück und emittiert dabei Licht mit entsprechender Wellenlänge. Die wahrscheinlichsten dieser Übergänge führen bei Neon zu einer Emission von rötlichem Licht. Bei dem Quecksilber war bei den beiden Messungen keine solche Beobachtung möglich.

Die aufgenommen Werte für die  $I_A/U_B$ -Charakteristiken sind in Abbildung 2 dargestellt<sup>2</sup>. Zu erkennen ist bereits, dass der Kurvenverlauf bei dem flüssigem Quecksilber der

---

<sup>2</sup>Darstellung mit der Python Bibliothek „matplotlib“. Um den Verlauf zwischen einzelnen Maxima

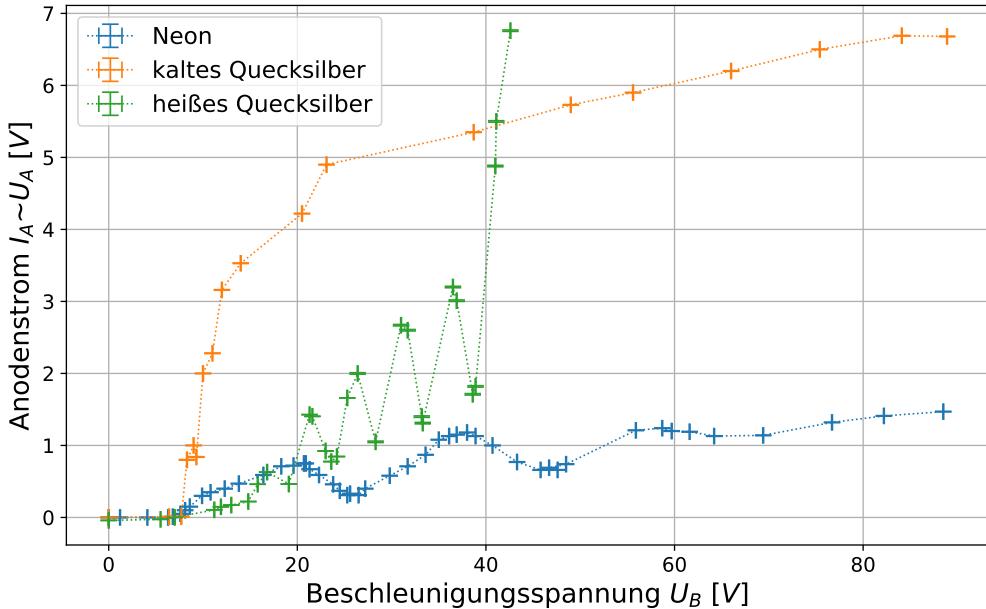


Abbildung 2:  $I_A/U_B$ -Charakteristiken der Franck-Hertz-Röhren.

Kennlinie einen logarithmischen Verlauf annimmt, wohingegen bei dem Neon und noch ausgeprägter bei dem erhitzen Quecksilber der gemessene Anodenstrom wiederholt zu- und abnimmt, so dass ein „zackiges“ Muster entsteht.<sup>3</sup>. Bei dem heißen Quecksilber sind fünf Maxima erkennbar, bei dem Neon hingegen drei. Dies zeigt, dass die Restenergie der Elektronen nach dem Stoß nicht ausreicht, um die Gegenspannung zu überwinden, weswegen der Anodenstrom geringer wird. Erhöht man die Beschleunigungsspannung weiter, so steigt der Anodenstrom erneut, fällt jedoch wieder ab sobald die Elektronen genug Energie besitzen um zwei Atome anzuregen. Dadurch ergibt sich der charakteristische Verlauf der Franck-Hertz-Kurve. Die Anregungsspannungen entsprechen den Werten für die Energien in eV.

Mit Hilfe dieser Messungen lassen sich über die Abstände der Minima bzw. Maxima

und Minima zu skizzieren, sind die Messpunkte leicht miteinander verbunden. Der Verlauf wurde im Experiment bestätigt. Da für die Messung allerdings nur der Abstand der Maxima und Minima von Bedeutung sind, wurden die Zwischenräume weitgehend übersprungen.

<sup>3</sup>Die Linien zwischen den Messwerten dienen nur zur Verbildlichung und entsprechen nur genähert dem beobachteten Spannungsverlauf. Bei den Geraden handelt es sich eigentlich um Kurven mit hoher Steigung (bzw. hohem Abfall)

**Tabelle 1:** In dieser Tabelle sind die ermittelten Energien, Wellenlängen und Frequenzen dargestellt.

	E	$\lambda$	f
Ne	(19,23 $\pm$ 0,10) eV	(64,49 $\pm$ 0,34) nm	(4649 $\pm$ 25) THz
Hg(g)	(4,90 $\pm$ 0,05) eV	(253,0 $\pm$ 2,6) nm	(1185 $\pm$ 12) THz

(hier wurde der Mittelwert von beiden gebildet) die Energien der Elektronen bestimmen, die nötig sind um die Atome der Gase anzuregen. Dazu dient  $E = eU$ . Die Wellenlänge des emittierten Lichts bestimmt sich über  $\lambda = \frac{hc}{E}$ . Dabei ist  $h$  das planck'sche Wirkungsquantum. Ebenso lässt sich die Frequenz durch  $f = \frac{c}{\lambda}$  ermitteln. In Tabelle 1 sind die benötigten Energien für die Anregungen der Atome in den Gasen, sowie auch die Frequenzen und Wellenlängen des daraufhin emittierten Lichts, verzeichnet.<sup>4</sup>

Zur Bestimmung des Dampfdrucks in der Quecksilberröhre dient die Clausius-Clapeyron Formel (3.1):

$$\ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right) = \frac{\Delta H_{m,v}}{R} \left( \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \quad (3.1)$$

$$p_2 = \exp\left\{ \frac{H_{m,v}}{R} \left( \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \right\} \cdot p_1 \quad (3.2)$$

Dabei dient der Siedepunkt von Quecksilber als Referenzpunkt[2]<sup>5</sup>. Die Werte sind  $T_1 = 629,77\text{ K}$ , sowie  $p_1 = 101,325\text{ kPa}$ .  $R = 8,3145\text{ J/mol K}$  ist die allgemeine Gaskonstante[4] und  $H_{m,v} = (59,3 \pm 0,1)\text{ kJ/mol}$  die molare Verdampfungsenthalpie bzw. spezifische Verdampfungswärme[1]. Die Gleichung lässt sich dann nach  $p_2$  umstellen und mit den gemessenen Temperaturen  $T_2 = 291,15\text{ K}$ , also Raumtemperatur bzw.  $T_2 = 465,15\text{ K}$  ausrechnen.

Es folgen die Dampfdrücke  $p_{\text{kalt}} = (0,193 \pm 0,035)\text{ Pa}$ , also ein sehr starkes Vakuum, sowie  $p_{\text{warm}} = (1,84 \pm 0,20)\text{ kPa} \approx 0,02\text{ bar}$ , was immer noch ein sehr geringer Druck ist. Damit lässt sich nun die freie Weglänge der Elektronen in der Röhre berechnen. Dazu

<sup>4</sup>Unsicherheitsformeln zu den einzelnen Werten im Anhang.

<sup>5</sup>Wie in der Quelle unter dem Punkt Conclusions angemerkt, kann den beiden Werten eine relative Unsicherheit von 1% zugeordnet werden.

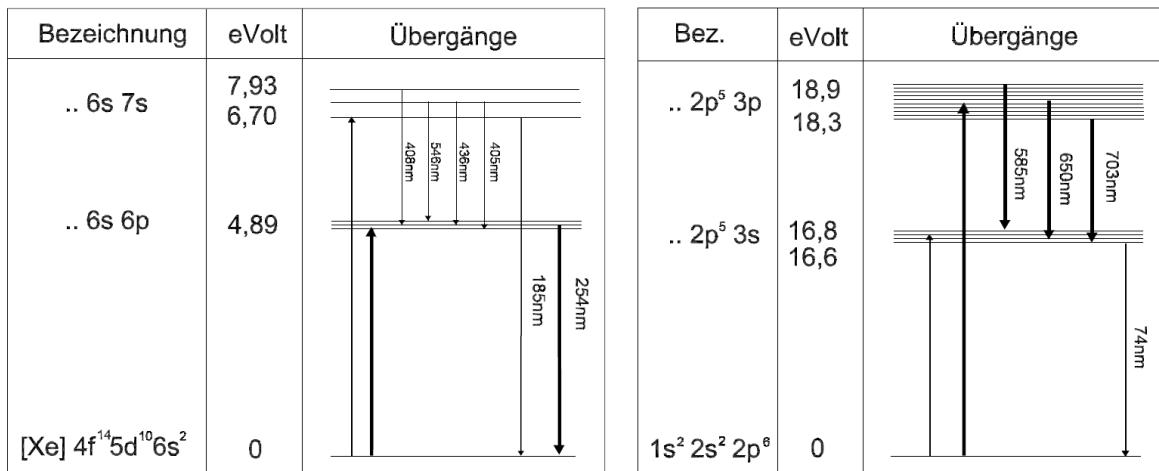
die Gleichung 3.3:

$$\lambda_{\text{frei}} = \frac{k_{\text{B}} \cdot T}{\sigma \cdot p}. \quad (3.3)$$

Einsetzen mit  $\sigma = \pi r_e^2 [4]$  ergibt bei Raumtemperatur  $\lambda_{\text{frei, kalt}} = (8,4 \pm 1,5) 10^8 \text{m}$  und erhitzt  $\lambda_{\text{frei, warm}} = (1,40 \pm 0,15) 10^6 \text{m}$ .

## 4 Diskussion

Die Ergebnisse dieses Versuches stützen weitgehend die Beschreibung der Gesetzmäßigkeiten bei Elektronenstößen an Atomen von J. Franck und G. Hertz. Es ließen sich bei dem Neon, wie auch bei dem erhitzten Quecksilber der charakteristische Verlauf der Franck-Hertz-Kurve erkennen. Auch die Energien, die durch diese Kurven berechnet



**Abbildung 3:** Diese Abbildung stellt das vereinfachte Termschemata von Quecksilber (links) und Neon (rechts) dar. Wahrscheinlichere Übergänge sind mit dickeren Pfeilen hervorgehoben.[3]

wurden korrelieren mit den in Abbildung 3 dargestellten Literaturwerten der Energien für die Übergänge von Neon und Quecksilber. Bei dem Quecksilber unterscheidet sich der berechnete Wert von  $(4,90 \pm 0,05) \text{ eV}$  nur um 0,2% von der ..6s6p-Übergangsenergie und die  $(19,23 \pm 0,10) \text{ eV}$  von Neon nur um 1,7% von der ..2p3p-Übergangsenergie. Diese Übergänge gehören zudem zu den häufiger auftretenden, was ebenfalls zu erwarten

war. Vergleicht man nun die berechneten Wellenlängen, so unterscheidet sich die des Quecksilbers auch hier nur um 0,4% von dem Literaturwert. Bei dem Neon ist jedoch keine Wellenlänge des Lichts gegeben, welches bei dem Zurückfallen aus ..2p3p nach 1s2s2p entstehen würde. Vergleicht man die berechneten ( $64,49 \pm 0,34$ ) nm stattdessen mit den bei einem Sprung einer tieferen Schale zum Ruhezustand entstehenden 74 nm, so ist zu folgern, dass der Sprung aus einer höheren Schale Licht mit größerer Energie emittiert, was sinngemäß erscheint.

Betrachtet man nun die Sichtbarkeit des emittierten Lichts, so lassen sich die Beobachtungen anhand der Abbildung 3 einfach erklären: Bei der Neonröhre war rötliches Licht zu sehen und häufige Übergänge führen zu emittiertem Licht mit Wellenlängen um 600 nm, wo sich das rötliche Licht im sichtbaren Spektrum befindet. Bei dem Quecksilber ist es zwar möglich Licht im sichtbaren Bereich zu emittieren, welches violett oder bläulich scheinen würde, jedoch sind diese Übergänge deutlich seltener als solche im Ultraviolettbereich.

Dass das Quecksilber bei Raumtemperatur die Charakteristiken der Franck-Hertz-Kurve nicht besitzt liegt daran, dass sich bei solch niedrigen Temperaturen kaum Quecksilberatome im gasförmigen Zustand befinden. Es kommt kaum zu Elektronenstößen und die Elektronen können beinahe ungehindert zur Kathode gelangen. Dadurch bildet sich stattdessen die für eine Triode typische charakteristische Kurve aus, welche einen ungefähr logarithmischen Verlauf hat.

Jedoch liegen die berechneten Werte der freien Weglänge deutlich über den erwarteten Werten. Die mittlere freie Weglänge bei Raumtemperatur ist größer als der Abstand zwischen Kathode und Gitter, was sich mit dem niedrigen Druck bei Raumtemperatur deckt. Während die Weglänge bei Ofentemperatur immerhin niedriger ist, als die bei Raumtemperatur, so ist sie immer noch viel größer als der Abstand Kathode-Gitter.

## 5 Schlussfolgerung

Die aufgenommenen, wie auch die ermittelten Werte entsprechen weitgehend den zu erwartenden Verhältnissen, wie sie von J.Franck und G.Hertz beschrieben wurden. Eine Wiederholung des Versuchs ist demnach nicht notwendig, wobei eine automatische Aufnahme der Werte über einen Computer bessere bzw. genauere Werte aufnehmen könnte als das manuelle Auftragen.

Lediglich die berechneten mittleren freien Weglängen liegen weit von den Erwartungen, was jedoch durch erneute Werteaufnahme ebenso nicht verbessert werden kann. Nach eingehender Fehlersuche und Validierung aller Referenzquellen kann die Rechnung wiederholt werden. Da die ermittelte Energie ein realistischer Wert ist, kann diese Fehlersuche auf das  $\sigma$  sowie den Druck  $p_{\text{Raumtemperatur}}$  bzw.  $p_{\text{Ofentemperatur}}$  begrenzt werden. Genauere Fehlerquellen waren nicht aufzufinden.

## 6 Anhang

### 6.1 Unsicherheitsrechnung

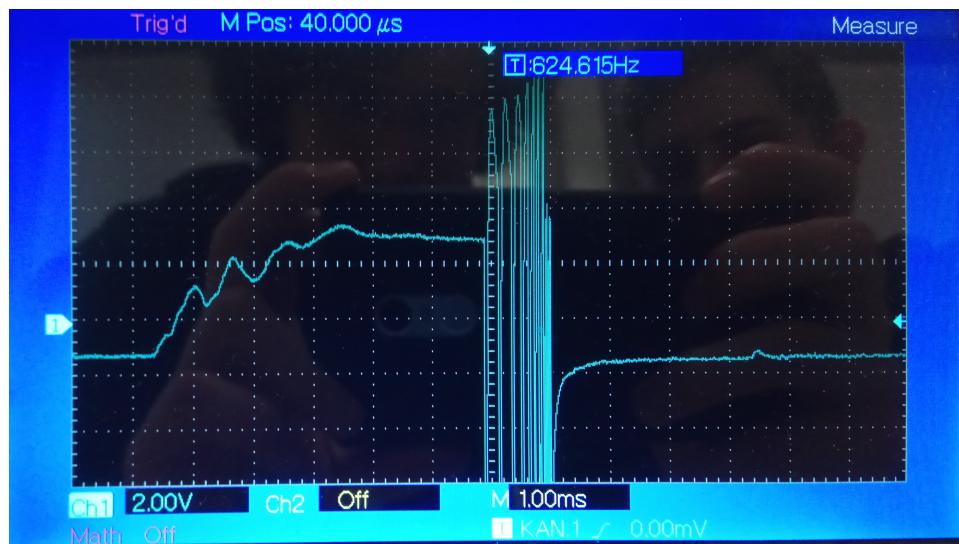
$$x = \sum_{i=1}^N x_i; \quad u(x) = \sqrt{\sum_{i=1}^N u(x_i)^2}$$

**Abbildung 4:** Formel für kombinierte Unsicherheiten des selben Typs nach GUM.

$$f = f(x_1, \dots, x_N); \quad u(f) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} u(x_i) \right)^2}$$

**Abbildung 5:** Formel für sich fortpflanzende Unsicherheiten nach GUM.

### 6.2 Oszilloskopkurven



**Abbildung 6:** Franck-Hertz-Kurve des Neons am Oszilloskop. Das Relikt in der Mitte ist zu vernachlässigen.



Abbildung 7: Franck-Hertz-Kurve des Quecksilbers bei Raumtemperatur am Oszilloskop.

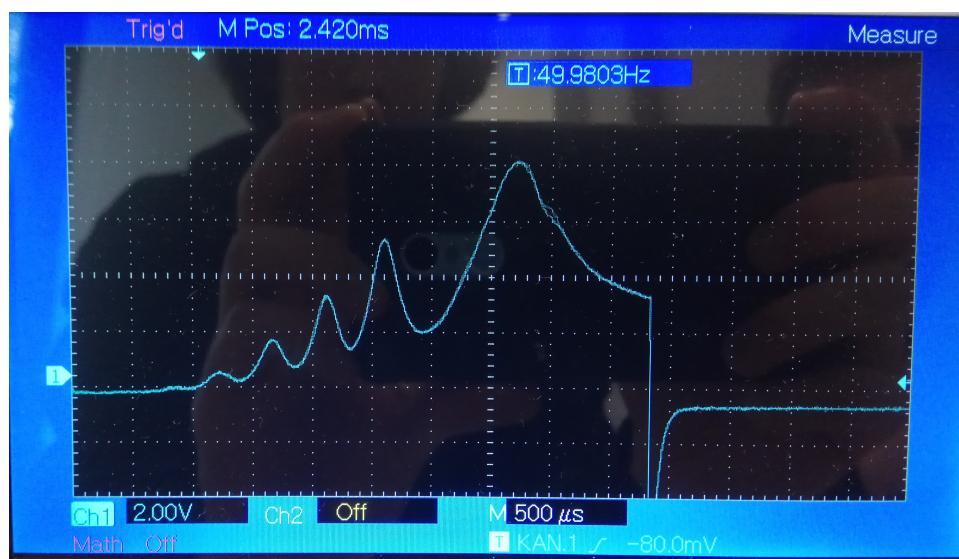


Abbildung 8: Franck-Hertz-Kurve des erhitzten Quecksilbers am Oszilloskop.

## Literatur

- [1] mai2014@andyhoppe.com. *Quecksilber: Stoffeigenschaften*. URL: <http://www.periodensystem.info/elemente/quecksilber> (besucht am 01.05.2018).
- [2] Daniel G. Friend Marcia L. Huber Arno Laesecke. *The Vapor Pressure of Mercury*. URL: <http://www.physics.rutgers.edu/%7Eeandrei/389/NISTIR.6643.pdf> (besucht am 01.05.2018).
- [3] WWU Münster. *Franck-Hertz-Versuch*. URL: [https://sso.uni-muenster.de/LearnWeb/learnweb2/pluginfile.php/1334783/mod\\_resource/content/1/Franck-Hertz-Versuch\\_Einf.pdf](https://sso.uni-muenster.de/LearnWeb/learnweb2/pluginfile.php/1334783/mod_resource/content/1/Franck-Hertz-Versuch_Einf.pdf) (besucht am 01.05.2018).
- [4] National Institute of Standards und Technology. *The NIST Reference on Constants, Units and Uncertainty*. URL: <https://physics.nist.gov/cuu/Constants/index.html> (besucht am 01.05.2018).