

VERSUCHSBERICHT ZU

A2 - FRANCK-HERTZ-VERSUCH

Gruppe 14Mo

Alexander Neuwirth (E-Mail: a_neuw01@wwu.de)
Leonhard Segger (E-Mail: l_segg03@uni-muenster.de)

durchgeführt am 30.04.2018
betreut von
Fabian Schöttke

6. Mai 2018

Inhaltsverzeichnis

1	Kurzfassung	3
2	Methoden	3
3	Ergebnisse und Diskussion	4
3.1	Beobachtung	4
3.2	Datenanalyse	7
3.2.1	Unsicherheiten	7
3.2.2	Quecksilber-Charakteristik	7
3.2.3	Neon-Charakteristik	8
3.2.4	Bestimmung von Anregungsenergie, Wellenlänge und Frequenz der Strahlung	8
3.2.5	Berechnung der mittleren freien Weglänge der Elektronen	8
3.3	Diskussion	9
4	Schlussfolgerung	10
5	Anhang	11

1 Kurzfassung

Der Franck-Hertz-Versuch erlaubt es die gequantelten Energieniveaus in Atomen nachzuweisen, da sich bei passender mittlerer freier Weglänge zwischen den Atomen eine charakteristische I_A/U_B -Kurve messen lässt. Diese ist nur erklärbar, wenn die Übergänge der Elektronen zwischen den Energieniveaus diskrete Energiedifferenzen haben. Der Franck-Hertz-Versuch erlaubt es die gequantelten Energieniveaus in Atomen nachzuweisen, da sich bei passender mittlerer freier Weglänge zwischen den Atomen eine charakteristische I_A/U_B -Kurve messen lässt. Diese ist erklärbar, wenn die Übergänge der Elektronen zwischen den Energieniveaus diskrete Energiedifferenzen haben.

Dementsprechend erwarteten wir bei einer Neonröhre und bei aufgeheizter Quecksilberdampföhre die Franck-Hertz-Kennlinien der Röhren mit mehreren Extremwerten. Die mittlere freie Weglänge im Gas sollte in diesen Fällen kleiner sein als der Abstand zwischen Kathode und Anode. Dies ließ sich so zeigen. Die Energien der Übergänge der Elektronen im Atom erwarteten wir gemäß den wahrscheinlichsten Anregungen in den Termschemata von Quecksilber und Neon. Dies ließ sich nur für die Neonröhre eindeutig zeigen, bei der auch die Emission von sichtbarem Licht erwartungsgemäß beobachtbar war. Bei der erhitzten Quecksilberöhre wurde allerdings eine Übergangsenergie berechnet, die sich mit keinem der Übergänge im Hg-Atom deckte.

Bei kalter Quecksilberöhre wurde hingegen ein monotoner, plötzlicher Anstieg des Anodenstroms mit der Beschleunigungsspannung erwartet, da hier die mittlere freie Weglänge zu groß ist, um eine nennenswerte Anzahl von inelastischen Zusammenstößen zu ermöglichen und somit keine Minima auftreten. Dies konnte aufgrund eines Fehlers in der Messapparatur weder nachgewiesen noch widerlegt werden.

2 Methoden

Untersucht wurde eine Franck-Hertz-Röhre mit Quecksilberfüllung und eine mit Neonfüllung. Diese wurden, wie in Abb. 1 dargestellt, verschaltet. Die Quecksilberöhre befand sich in einem Ofen, der sie auf bis zu 300 °C aufheizen kann. Der Anodenstrom ist sehr klein, weshalb er vom Betriebsgerät in eine Spannung U_A umgewandelt wurde, die zum Anodenstrom proportional ist.

Zunächst wurde die I_A/U_B -Charakteristik der Röhre mit Quecksilberfüllung bei Zimmertemperatur aufgenommen. Dazu wurde die Beschleunigungsspannung U_B langsam erhöht und diese sowie die Spannung U_A gemessen.

Im Anschluss wurde der Ofen auf ca. 180 °C erhitzt. Dann wurde das Betriebsgerät so eingestellt, dass es eine Sägezahnspannung mit einer Frequenz von 60 Hz als Beschleunigungsspannung ausgibt. Der resultierende Anodenstrom wurde zunächst mit einem Oszilloskop betrachtet und Gegenspannung U_G und Heizstrom I_H so eingestellt, dass sich mindestens zwei Minima der Franck-Hertz-Kurve ablesen ließen. Dies ist beispielhaft für die Neonröhre in Abb. 2 dargestellt. Dann wurde mithilfe manueller Regelung der Beschleunigungsspannung die I_A/U_B -Charakteristik wie zuvor aufgenommen und die Temperatur im Ofen gemessen.

Analog wurde die Neon-Röhre bei Raumtemperatur untersucht, wobei hier zusätzlich ein Steuergitter (mit Spannung U_S) verwendet wurde, um störende Einflüsse durch Abstoßung der Elektronen untereinander zu verringern.

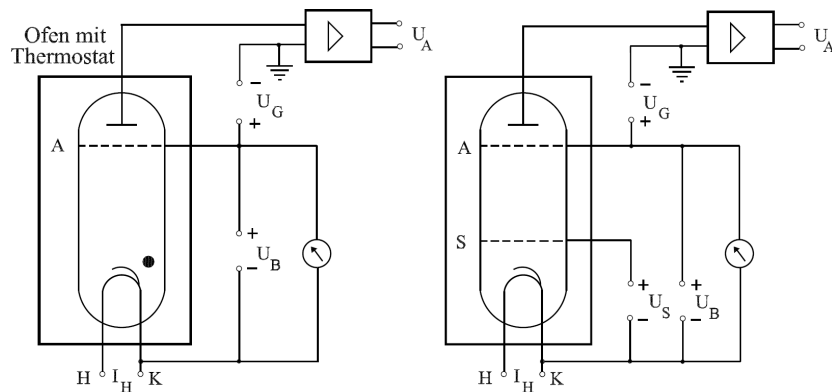


Abbildung 1: Schaltungen der Franck-Hertz-Röhren mit Quecksilber (links) und Neon (rechts).[4].

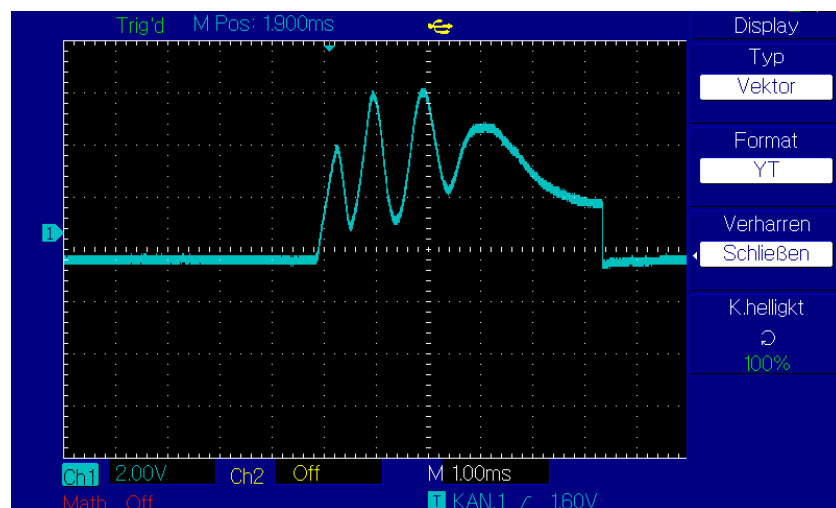


Abbildung 2: Bild des Oszilloskops bei Messung der Neonröhre.

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Beobachtung

Die vom Operationsverstärker ausgehende niedrigste Gegenspannung beträgt 1,25 V. Zunächst wurde die Franck-Hertz-Röhre mit Quecksilber bei Raumtemperatur ($(19,0 \pm 1,5)^\circ\text{C}$) untersucht. In Abb. 3 ist der gemessene I_A/U_B -Verlauf dargestellt.

Danach wurde der Ofen der Quecksilberröhre eingeschaltet und diese mit einer Sägezahnspannung betrieben. Während des Heizvorgangs war am Oszilloskop die Bildung von

Maxima und Minima, die der charakteristischen Franck-Hertz-Kurve ähnelten, sichtbar. Ein Erhöhen der Gegenspannung hatte eine geringere Messspannung, bzw. Stromstärke, zur Folge. Die durch manuelle Aufnahme einzelner Messpunkte bestimmte Quecksilbercharakteristik bei einer Temperatur von 165°C bis 180°C ist in Abb. 4 abgebildet. Erwärmt man die Röhre weiter über eine Temperatur von 190°C hinaus, sieht man am Oszilloskop, dass die Maxima abfallen und verschwimmen. Zu keinem Zeitpunkt ließ sich emittiertes Licht in der Quecksilberröhre beobachten.

Die Neonröhre wurde ebenfalls bei Raumtemperatur betrieben und es entstand ein orange-rötlicher Lichtstreifen, der sich durch Variation der Beschleunigungsspannung verschieben ließ. Dem Steigern der Spannung folgte eine Annäherung des Licht emittierenden Bereichs in der Triode an die Kathode. Bei einer hinreichend groß gewählten Spannung sahen wir nahe der Anode einen neuen zweiten Lichtstreifen. Um die Neon-Charakteristik aufnehmen zu können, mussten Heiz- und Beschleunigungsspannung mit Hilfe des Oszilloskop angepasst werden. Die gemessene Charakteristik ist in Abb. 5 enthalten. Nach der Optimierung der Rahmenbedingungen durch das Oszilloskop war deutlich weniger Licht in der Neonröhre sichtbar.

Auffällig ist, dass beide Charakteristiken bei einer Beschleunigungsspannung von ca. 0 V eine Stromstärke deutlich größer Null aufweisen. Die auftretenden Maxima und Minima haben mit steigender Beschleunigungsspannung höhere Stromstärken. Im späteren Verlauf des Experiments stellte sich heraus, dass die Beschleunigungsspannung am Frank-Hertz-Generator ungleich der direkt an Anode und Kathode gemessenen Spannung ist. In Abb. 3 wurde U_B noch am Generator gemessen. Bei geringster Beschleunigungsspannung wurde eine Beschleunigungsspannung von ca. 23 V angezeigt. Wenn man diese Spannung jedoch an Anode und Kathode misst, ergibt sich ca. $U_B = 0\text{ V}$.

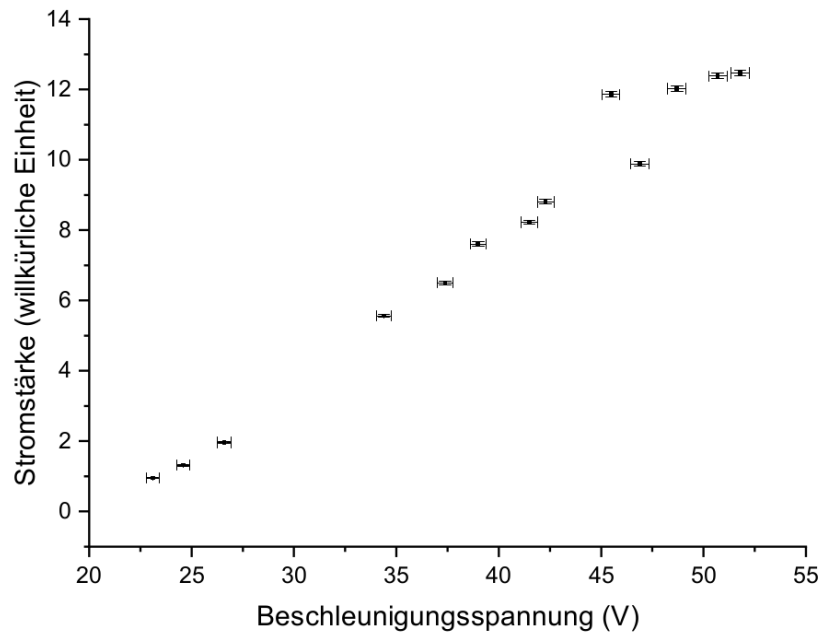


Abbildung 3: Aufgenommene Quecksilber-Charakteristik bei $T=(19,0 \pm 1,5)^\circ\text{C}$. Die Stromstärke wurde mit einem Operationsverstärker in eine messbare Spannung umgewandelt.

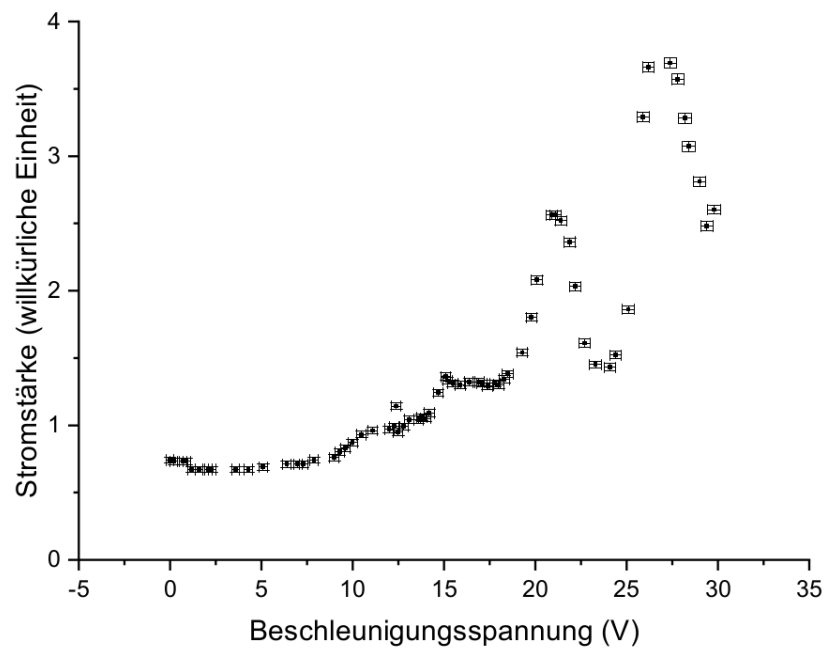


Abbildung 4: Aufgenommene Quecksilber-Charakteristik bei $T=(175 \pm 7)^\circ\text{C}$. Die Stromstärke wurde mit einem Operationsverstärker in eine messbare Spannung umgewandelt.

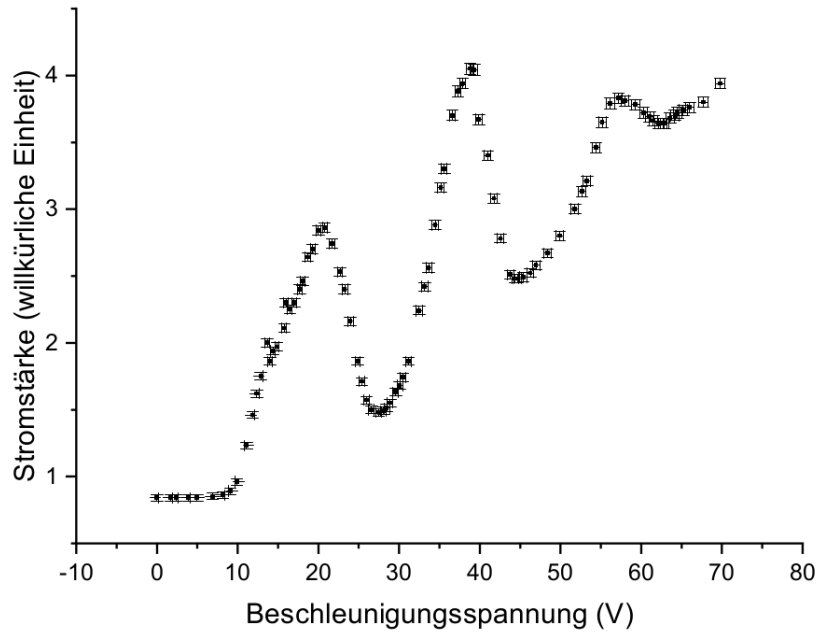


Abbildung 5: Aufgenommene Neon-Charakteristik bei $T=(19,0 \pm 1,5)^\circ\text{C}$. Die Stromstärke wurde mit einem Operationsverstärker in eine messbare Spannung umgewandelt.

3.2 Datenanalyse

3.2.1 Unsicherheiten

Die Unsicherheit des Voltmeters beträgt $\pm(U \cdot 0,5\% + 200 \text{ mV})$ für die Beschleunigungsspannung und $\pm(U \cdot 0,5\% + 20 \text{ mV})$ für die gemessene Spannung (0,5% vom angezeigten Wert).[6] Die zusätzliche Unsicherheit des Operationsverstärkers wird als demgegenüber vernachlässigbar angenommen.

Die Unsicherheit des Thermometers vom Typ K ist $1,5^\circ\text{C}$ in dem gemessenen Temperaturintervall.[1] Zusätzlich ist die Temperatur nicht überall im Heizkasten gleich und schwankte beim Aufnehmen der Quecksilber-Charakteristik von 165 bis 180°C , deshalb wählen wir für diese Messung die Unsicherheit als 7°C .

Bei der Bestimmung der Beschleunigungsspannung an Extremstellen nehmen wir die Unsicherheit als aus dem Verlauf der Kurve und dem Abstand zum nächsten Messpunkt zusammengesetzt an.

3.2.2 Quecksilber-Charakteristik

In Abb. 4 ist die I_A/U_B -Charakteristik des Quecksilbers bei $T=(175 \pm 7)^\circ\text{C}$ dargestellt. Daraus lassen sich folgende Abstände ablesen:

- Maxima:

$$\Delta U_1 = (27,1 \pm 0,3) \text{ V} - (21,0 \pm 0,1) \text{ V} = (6,1 \pm 0,3) \text{ V}$$

- Minima

$$\Delta U_2 = (29,4 \pm 0,2) \text{ V} - (24,1 \pm 0,2) \text{ V} = (5,3 \pm 0,3) \text{ V}$$

$$\Delta U_3 = (24,1 \pm 0,2) \text{ V} - (18,0 \pm 0,5) \text{ V} = (6,1 \pm 0,5) \text{ V}$$

Im Mittel ergibt sich ein ΔU_{Hg} von $(5,8 \pm 0,2) \text{ V}$.

3.2.3 Neon-Charakteristik

In Abb. 5 ist die I_A/U_B -Charakteristik des Neons bei $T=(19,0 \pm 1,5)^\circ\text{C}$ dargestellt. Daraus lassen sich folgende Abstände ablesen:

- Maxima:

$$\Delta U_1 = (38,8 \pm 0,2) \text{ V} - (20,8 \pm 0,4) \text{ V} = (18,0 \pm 0,4) \text{ V}$$

$$\Delta U_2 = (57,2 \pm 0,2) \text{ V} - (38,8 \pm 0,2) \text{ V} = (18,4 \pm 0,3) \text{ V}$$

- Minima

$$\Delta U_3 = (44,9 \pm 0,5) \text{ V} - (27,5 \pm 0,3) \text{ V} = (17,4 \pm 0,6) \text{ V}$$

$$\Delta U_4 = (62,9 \pm 0,5) \text{ V} - (45,5 \pm 0,4) \text{ V} = (18,0 \pm 0,7) \text{ V}$$

Im Mittel ergibt sich ein ΔU_{Ne} von $(17,9 \pm 0,3) \text{ V}$.

3.2.4 Bestimmung von Anregungsenergie, Wellenlänge und Frequenz der Strahlung

Aus den Spannungsdifferenzen der Maxima, bzw. Minima, lässt sich die kinetische Energie eines Elektrons bestimmen, die notwendig ist um den Resonanzzustand des Atoms anzuregen. Sie beträgt $\Delta E = \Delta U e$. Die Frequenz folgt aus $\nu = \Delta E/h$ und die Wellenlänge aus $\lambda = c/\nu$. [5] Die jeweiligen Werte sind in Tabelle 1 aufgelistet.

Tabelle 1: Aus den Charakteristiken von Quecksilber und Neon berechnete kinetische Energie, sowie Frequenz und Wellenlänge des emittierten Lichts.

	ΔU	ΔE	Frequenz ν	Wellenlänge λ
Quecksilber	$(5,8 \pm 0,2) \text{ V}$	$(5,8 \pm 0,2) \text{ eV}$	$(1402 \pm 48) \text{ THz}$	$(214,0 \pm 6,3) \text{ nm}$
Neon	$(17,9 \pm 0,3) \text{ V}$	$(17,9 \pm 0,3) \text{ eV}$	$(4328 \pm 73) \text{ THz}$	$(69,3 \pm 1,2) \text{ nm}$

3.2.5 Berechnung der mittleren freien Weglänge der Elektronen

In der Einführung wurde folgende Formel aufgeführt zum Bestimmen der freien Weglänge λ der Elektronen:

$$\lambda = \frac{k_B T}{\sigma p} \quad \text{mit} \quad \sigma = \pi r_{\text{Hg}}^2 \quad (1)$$

Der Druck p wird durch die Clausius-Clapeyron-Gleichung in integrierter Form bestimmt:

$$\ln \left(\frac{p_2}{p_1} \right) = \frac{\Delta H_{\text{m,v}}}{R} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \quad (2)$$

Dabei beträgt die allgemeine Gaskonstante $R = 8,3145 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$, die Verdampfungsenthalpie von Quecksilber $\Delta H_{m,v} = 59,3 \text{ kJ/mol}$, der Radius eines Quecksilberatoms $r_{\text{Hg}} = 150 \text{ pm}$ und der Referenzpunkt ist $T_1 = 293,15 \text{ K}$ mit $p_1 = 0,242 \text{ Pa}$. [3][2][5]

Durch Umformen von Gleichung (2) ergibt sich p_{kalt} und p_{warm} . Daraus wiederum folgt mit Gleichung (1) λ_{kalt} und λ_{warm} . Die so bestimmten Werte sind in Tabelle 2 enthalten (Unsicherheiten gemäß GUM Gleichung (3)).

Tabelle 2: Mittlere frei Weglänge von Elektronen in Quecksilberdampf bei Raumtemperatur(kalt) und Heiztemperatur(warm).

	Temperatur T	Druck p	freie Weglänge λ
kalt	$(292,15 \pm 1,50) \text{ K}$	$(0,223 \pm 0,028) \text{ Pa}$	$(0,256 \pm 0,032) \text{ m}$
warm	$(453,15 \pm 7,00) \text{ K}$	$(1,3 \pm 0,2) \text{ kPa}$	$(0,068 \pm 0,010) \text{ mm}$

3.3 Diskussion

Die Messung der Quecksilber-Charakteristik bei Raumtemperatur (Abb. 3) zeigt zwar einen monotonen Anstieg des Anodenstroms mit der Beschleunigungsspannung, was zu erwarten war, da hier aufgrund der hohen mittleren Weglänge kaum inelastische Stöße zwischen Elektronen und Atomen stattfinden. Der charakteristische steile Anstieg ab $U_B \geq U_G$ lässt sich jedoch nicht erkennen. Dies liegt vermutlich an einem Fehler in der Elektronik, der entstand, wenn man die Beschleunigungsspannung am dafür vorgesehenen Ausgang des Operationsverstärkers und nicht direkt zwischen Kathode und Anode misst, wie es in den anderen Messungen getan wurde.

Die Quecksilber-Charakteristik in Abb. 4 zeigt die erwarteten Minima und Maxima, die durch unelastische Stöße der Elektronen entstehen, bei Elektronenenergien, die ausreichen, um die Atome anzuregen. Die anhand des Abstands der Extrema berechnete Energie Tabelle 1 lässt sich entgegen der Erwartung auch innerhalb der doppelten Unsicherheit nicht mit den Angaben aus den Termschemata von Quecksilber in Einklang bringen (Abb. 6). Dies könnte an internen Verlusten der Triode oder an der Überlagerung von zwei Franck-Hertz-Kurven durch zwei verschiedene Übergänge liegen. Wenn beispielsweise der unwahrscheinlichere Übergang in Abb. 6 immer noch ausreichend häufig stattfindet, um einen Einfluss zu haben, würde dies die gemessene Kurve verzerren.

Bei der Neonröhre hingegen entspricht die ermittelte Energie des Übergangs innerhalb der Unsicherheiten dem wahrscheinlichsten Anregungsübergang bei $\Delta E \approx 18,3 \text{ eV}$. Demnach kann hier die Angabe an den Termschemata unterstützt werden.

Auch dass es bei der Neonröhre Emission im sichtbaren Bereich und bei der Quecksilberöhre keine sichtbare Emission im sichtbaren Bereich gibt, konnte augenscheinlich bestätigt werden. Dies lässt sich durch die wahrscheinlichen Übergänge im Neon-Atom mit Wellenlängen im sichtbaren Bereich erklären, während im Quecksilber-Atom der Übergang im UV-Bereich am wahrscheinlichsten ist.

Dass bei diesen Charakteristiken bei $U_B < U_G$ und sogar bei $U_B = 0$ ein Anodenstrom messbar ist, widerspricht den Erwartungen und lässt sich nur durch ein kontraintuitives Verhalten des Operationsverstärkers erklären.

Bezeichnung	eV	Übergänge	Bez.	eV	Übergänge
.. 6s 7s	7,93 6,70		.. 2p ^s 3p	18,9 18,3	
.. 6s 6p	4,89		.. 2p ^s 3s	16,8 16,6	
[Xe] 4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ²	0		1s ² 2s ² 2p ⁶	0	

Abbildung 6: Vereinfachte Termschemata von Quecksilber (links) und Neon (rechts).
Dicke Pfeile stellen Übergänge mit der größten Wahrscheinlichkeit dar.[4]

Bei Erhöhung der Temperatur auf mehr als 190 °C kann keine Franck-Hertz-Kurve mehr gemessen werden, was sich dadurch begründen ließe, dass die mittlere freie Weglänge so gering ist, dass die Elektronen durch inelastische Stöße so stark abgelenkt werden, dass sie nicht mehr durch das Gegenfeld zur Anode kommen.

4 Schlussfolgerung

Es ließen sich einige, aber nicht alle, Hypothesen bestätigen. Bei Neonröhre und erhitzter Quecksilberröhre ließen sich die erwarteten Franck-Hertz-Kurven für die I_A/U_B -Charakteristiken messen und somit die Quantisierung der Energiezustände im Atom zeigen. Beim Ablesen der Energie der Übergänge aus den Abständen der Extrema ließ sich jedoch nur im Fall von Neon die Energie des wahrscheinlichsten Übergangs aus den Messergebnissen herleiten. Für eine genauere Untersuchung müsste man weitere Extrema bei höheren Beschleunigungsspannungen messen. Dies war nicht möglich, da der Operationsverstärker ab einem bestimmten Anodenstrom diesen nicht mehr weiter verstärkte. Die erwartete Emission von Photonen im sichtbaren Bereich der Neonröhre ließ sich mit dem Auge beobachten. Bei der erhitzten Quecksilberröhre konnten wie erwartet keine Emission von Photonen im sichtbaren Bereich beobachtet werden. Um die Emission der Photonen im UV-Bereich nachzuweisen, müsste man das Experiment mit einem UV-Detektor durchführen.

Dass bei Betrieb der Quecksilberröhre bei Raumtemperatur eine Triodenkennlinie mit steilem Anstieg im Bereich der Gegenspannung messbar ist, konnte aufgrund eines Fehlers des Operationsverstärkers nicht nachgewiesen werden.

Literatur

- [1] R. Hörnemann GmbH. *DIN-Toleranzen für Thermopaare und Termoleitungen*. URL: http://www.hoernemann-rh.de/technik_details.asp?technikid=3 (besucht am 05.05.2018).

- [2] Charles F. Hill. „Measurement of Mercury Vapor Pressure by Means of the Knudsen Pressure Gauge“. In: *Phys. Rev.* 20 (3 Sep. 1922), S. 259–266. DOI: 10.1103/PhysRev.20.259. URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRev.20.259>.
- [3] mai2014@andyhoppe.com. *Quecksilber: Stoffeigenschaften*. URL: <http://www.periodensystem.info/elemente/quecksilber> (besucht am 05.05.2018).
- [4] WWU Münster. *Franck-Hertz-Versuch Einführung*. URL: https://sso.uni-muenster.de/LearnWeb/learnweb2/pluginfile.php/1334783/mod_resource/content/1/Franck-Hertz-Versuch_Einf.pdf (besucht am 04.05.2018).
- [5] NIST. *NIST Reference on Constants, Units and Uncertainty*. URL: <https://physics.nist.gov/cuu/index.html> (besucht am 05.05.2018).
- [6] FH-Pforzheim. *Infoblatt Digitalmultimeter*. URL: http://eitidaten.fh-pforzheim.de/daten/labore/ellt/unterlagen_webseite/von_becker/Infoblatt_DigMM.pdf (besucht am 05.05.2018).

5 Anhang

- Fortpflanzung von Unsicherheiten nach GUM

$$u(f(x_1, \dots, x_N)) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} u(x_i) \right)^2} \quad (3)$$