

Versuchsprotokoll A2

Franck-Hertz-Versuch

13.05.2015



Alexander Schlüter, Tobias Holthaus

Gruppe 23/mi

alx.schlueter@gmail.com

holthaus.tobias@gmail.com

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
2	Versuch	2
2.1	Quecksilbertriode bei Zimmertemperatur	4
2.2	Erhitzte Quecksilbertriode	5
2.3	Neontriode	6
3	Diskussion	7
3.1	Nr. 1 und 2	7
3.2	Nr. 4	8
3.3	Nr. 5	9

1 Einführung

Stößt ein Elektron auf ein Atom, so unterscheidet man zwischen zwei Arten von Stößen:

- Bei **elastischen** Stößen verliert das Elektron keine Energie, sondern ändert nur die Richtung
- Bei **unelastischen** Stößen wird ein Teil der kinetischen Energie des Elektrons an die am Atom gebundenen Elektronen abgegeben und diese werden in einen höheren Energiezustand gehoben. Nach kurzer Zeit fallen sie auf das ursprüngliche Niveau zurück, wobei ein Photon ausgesendet wird. Die Energiedifferenz ΔE hängt über die Plancksche Konstante h mit der Frequenz ν des ausgesendeten Photons zusammen:

$$\Delta E = h \cdot \nu \quad (1.1)$$

Im Franck-Hertz-Versuch werden Elektronen aus einer Glühkathode in einer Triode beschleunigt und stoßen unterwegs mit Gasatomen zusammen. Da die Energiezustände der am Elektron gebundenen Atome quantisiert sind und häufig ein bestimmter Energiezustand deutlich wahrscheinlicher ist als andere, muss die kinetische Energie der stoßenden Elektronen diese bestimmte Schwelle ΔE überschreiten, damit es vermehrt zu unelastischen Stößen kommt. Wird den stoßenden Elektronen kinetische Energie durch eine Beschleunigungsspannung U_B zugeführt, so muss

$$\Delta E = e \cdot U_B > \Delta E \quad (1.2)$$

gelten.

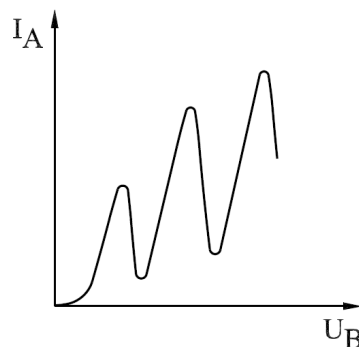


Abbildung 1: Aus der Theorie erwartete I_A/U_B -Charakteristik¹

In Abb. 1 ist dargestellt, wieviele Elektronen bei einer bestimmten Beschleunigungsspannung die Anode auf der anderen Seite der Triode erreichen. Zunächst ist die Energie der Elektronen zu gering für einen unelastischen Stoß und die Kurve nimmt wie die Kennlinie einer evakuierten Triode zu. Nach dem ersten Maximum ist ein schneller Abfall zu sehen, da hier die kinetische Energie der Elektronen groß genug für einen unelastischen Stoß direkt vor der Anode ist. Nach dem Stoß ist die Restenergie der Elektronen zu gering, um die Anode zu erreichen. Mit höherer Beschleunigungsspannung steigt diese Restenergie und es kommen wieder mehr Elektronen bis zur Anode, bis zum 2. Maximum: ab hier kommt es nun für viele Elektronen zu zwei unelastischen Stößen auf dem Weg durch die Triode usw.

Da Quecksilber bei Zimmertemperatur flüssig ist, muss es aufgeheizt werden. Die mittlere freie Weglänge λ ist der Erwartungswert der Strecke, die ein Elektron im Gas der Temperatur T und Druck p zurücklegt, bevor es unelastisch auf ein Gasatom stößt:

$$\lambda = \frac{k_B \cdot T}{\sigma \cdot p} \quad (1.3)$$

Dabei ist der Wirkungsquerschnitt σ die Fläche, die ein einfallendes Elektron treffen muss, damit es zum unelastischen Stoß kommt. Bei einem neutralen Atom mit Radius r beträgt $\sigma = \pi r^2$.

Die Clausius-Clapeyron-Gleichung stellt einen Zusammenhang zwischen der Temperatur und dem Dampfdruck eines Gases her. Relevant für den Versuch ist die **van-t'Hoffsche Gleichung**, die man durch integrieren der Clausius-Clapeyron-Gl. in der Näherung für ideale Gase erhält²:

$$p(T) = p_0 \cdot e^{\Lambda/R(1/T_0 - 1/T)} \quad (1.4)$$

Hierbei ist p_0 der Dampfdruck zur Temperatur T_0 , Λ die molare Verdampfungswärme des Gases und R die molare Gaskonstante.

2 Versuch

Der Aufbau ist in Abb. 2 zu sehen. Bei beiden Teilversuchen wird über eine Heizspannung U_H eine Glühkathode in einer Triode zum Glühen gebracht. Eine Beschleunigungsspan-

²Dermtröder. *Experimentalphysik 1*. 2008, S. 342.

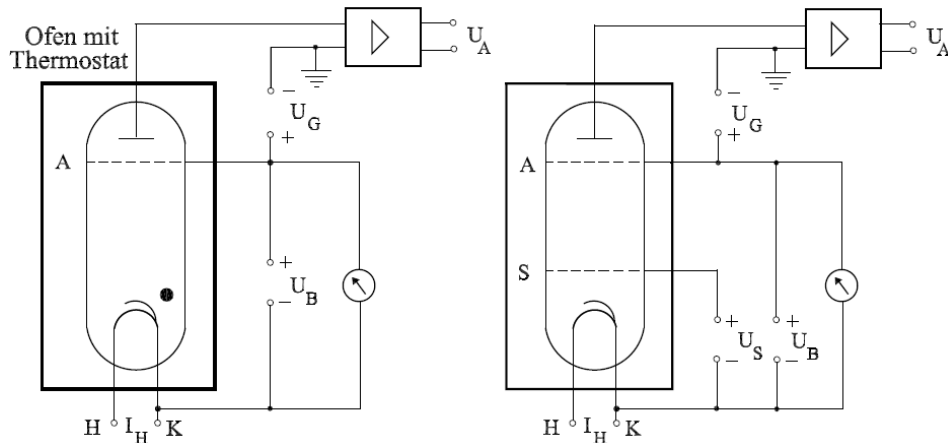


Abbildung 2: Aufbau der Franck-Hertz-Röhren mit Quecksilber (links) und Neon (rechts)³

nung U_B ist zwischen der Glühkathode und einem Gitter in Nähe der Anode auf der anderen Seite der Triode angelegt, sodass aus der Glühkathode austretende Elektronen beschleunigt werden.

Zwischen diesem Gitter und der Anode ist eine kleine Gegenspannung U_G angelegt, sodass nur Elektronen die Anode erreichen, deren kinetische Energie am Gitter größer als $e \cdot U_G$ ist. Der Strom I_A zwischen Anode und Kathode wird über einen Operationsverstärker in eine hierzu proportionale Spannung U_A umgewandelt. Im Folgenden kann mit U_A statt I_A gerechnet werden, da nur die Position der Maxima / Minima der I_A/U_B -Kurve entscheidend ist, nicht aber der genauer Wert von I_A .

Beim Quecksilberversuch befindet sich die Triode in einem Ofen mit Thermostat, um durch Erhitzen den Quecksilberdampfdruck in der Triode zu erhöhen und damit gemäß Gleichung (1.3) die mittlere freie Weglänge der Elektronen zu verringern. Beim Neonversuch ist dies nicht notwendig, da Neon bei Zimmertemperatur schon gasförmig ist. Allerdings befindet sich in der Neontriode zusätzlich ein Streugitter vor der Kathode mit Potentialdifferenz U_S , um den Austritt der Elektronen zu vereinfachen.

Am Praktikumstag waren die Trioden als fertiges Bauteil mit einem Betriebsgerät bereitgestellt, an dem die Spannungen U_B und U_G sowie die Amplitudenverstärkung durch den Operationsverstärker eingestellt werden konnten. Die Spannungen wurden mit Potentiometern abgelesen. Zusätzlich konnte am Betriebsgerät die Beschleunigungsspannung auf einen periodischen Sägezahnmodus eingestellt und dann an einem Oszilloskop der U_A -Zeit-Verlauf sichtbar gemacht werden.

Die Gegenspannung wurde bei allen Versuchen auf $U_G = (1,25 \pm 0,01) \text{ V}$ eingestellt.

2.1 Quecksilbertriode bei Zimmertemperatur

Zunächst wurde die U_A/U_B -Kurve der Quecksilbertriode bei Zimmertemperatur gemessen. Es wird ein monotoner Anstieg von U_A erwartet, da der Quecksilberdampfdruck sehr niedrig ist und fast keine Stöße stattfinden sollten. Das Ergebnis der Messung ist in Abb. 3 zu sehen:

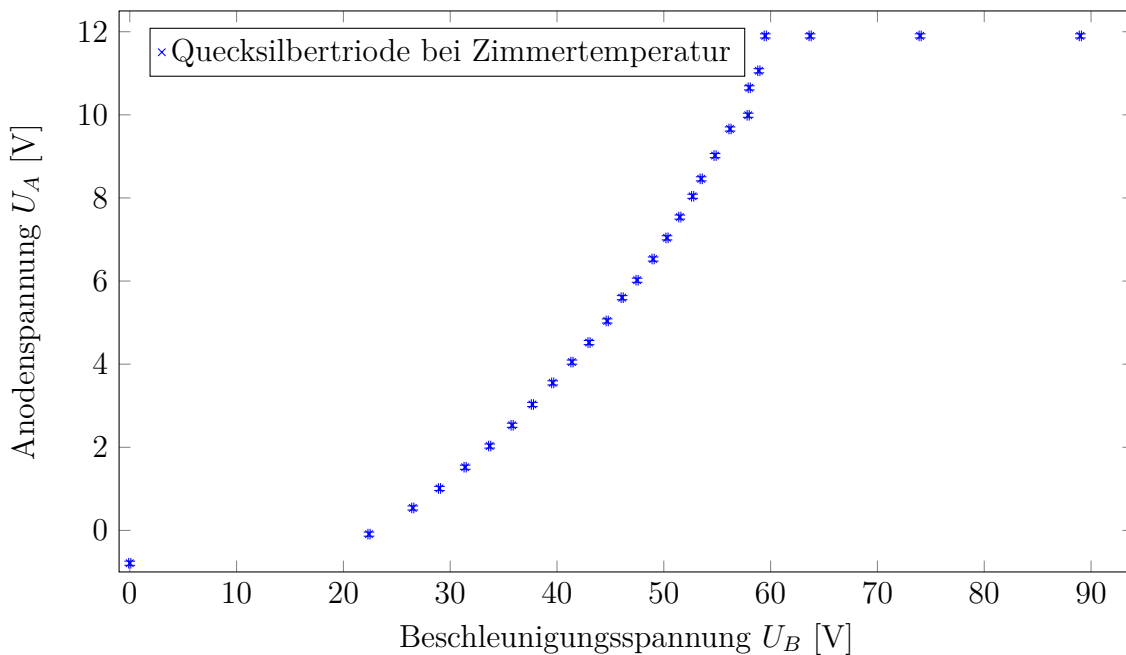


Abbildung 3: U_A/U_B -Charakteristik der Quecksilbertriode bei Zimmertemperatur

Die Fehlerbalken sind sehr kurz und deshalb schwer zu erkennen. Im Bereich von 0 bis 22 V Beschleunigungsspannung wurden keine Messwerte aufgenommen, da hier die Anodenspannung fast konstant blieb. Ein näherungsweise linearer Zusammenhang ist für $0 \text{ V} \leq U_B \leq 60 \text{ V}$ zu erkennen, für höhere Beschleunigungsspannung bleibt die Anodenspannung konstant bei 11,9 V.

2.2 Erhitzte Quecksilbertriode

Die Quecksilbertriode wurde mithilfe des Ofens auf $T = (200 \pm 12)^\circ\text{C}$ erhitzt. Der Fehler entsteht dadurch, dass der Ofen die Zieltemperatur durch Ein/Aus-Zyklen ansteuert. Es wird ein Verlauf wie in Abb. 1 erwartet. Die gemessene U_A/U_B -Charakteristik ist in Abb. 4 zu sehen:

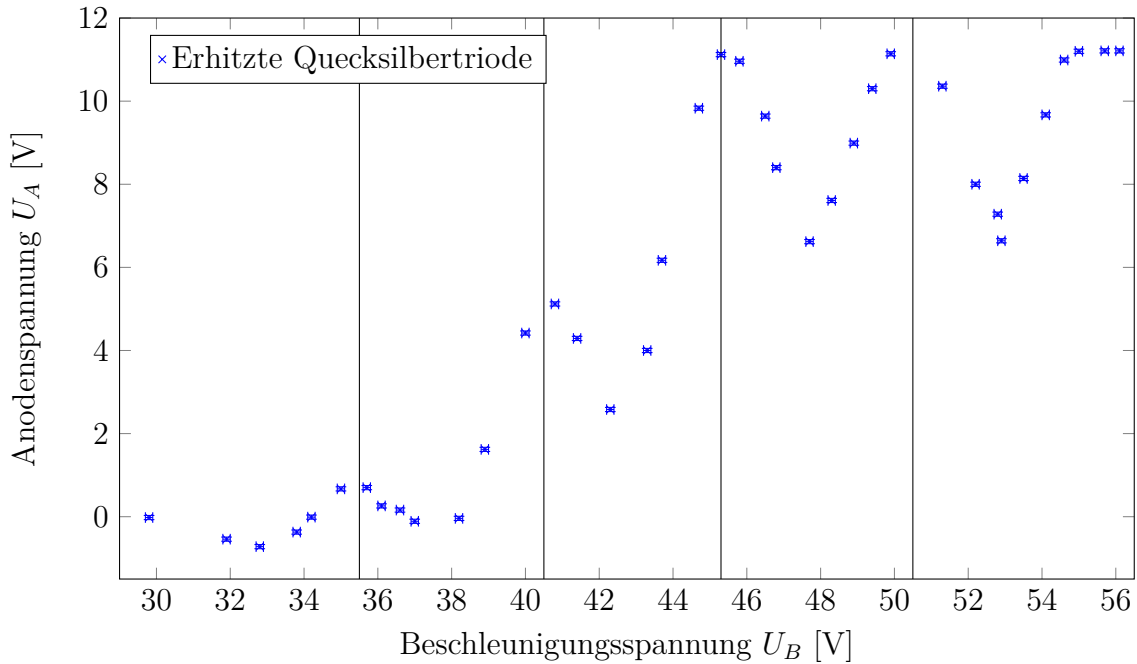


Abbildung 4: U_A/U_B -Kurve der Quecksilbertriode bei $T = 200^\circ\text{C}$

Die ersten zwei Messwerte wurden ausgelassen, um den Graphen zu entzerren. Die Fehlerbalken sind sehr kurz und deshalb schwer zu erkennen. Es sind die aus der Theorie erwarteten Minima und Maxima zu sehen. Die vertikalen Linien wurden ungefähr über die Extremstellen des Graphen gelegt (nach Augenmaß). Nach einer konservativen Schätzung ist der Fehler dieser Methode so groß wie der größere der beiden Abstände zu den Messpunkten links bzw. rechts von der Linie. Die Anregungsenergie berechnet sich aus der Differenz der Beschleunigungsspannung zwischen zwei aufeinander folgenden Maxima: $\Delta E = e \cdot \Delta U_B$

Der Mittelwert ist $\Delta E = (5,0 \pm 0,6) \text{ eV}$. Die Frequenz des ausgesendeten Lichtes beträgt laut Gleichung (1.1) $\nu = \Delta E/h = 1,21 \cdot 10^{15} \text{ Hz}$, was einer Wellenlänge von $\lambda = c/\nu = 248 \text{ nm}$ entspricht. Dieses Licht liegt also im UV-Bereich und ist nicht

n	U_B [V] beim n-ten Maximum	ΔE [eV] zum (n-1)-ten Maximum
1	$35,5 \pm 0,5$	-
2	$40,5 \pm 0,5$	$5,0 \pm 1,0$
3	$45,3 \pm 0,5$	$4,8 \pm 1,0$
4	$50,5 \pm 0,6$	$5,2 \pm 1,2$

Tabelle 1: Anregungsenergie berechnet aus den Abständen zwischen zwei Maxima

sichtbar.

Der Dampfdruck von Quecksilber beträgt laut⁴ $p_0 = 0,242 \text{ Pa}$ bei $T_0 = 20^\circ\text{C}$. Die molare Verdampfungswärme ist $\Lambda = 58,2 \text{ kJ/mol}$ ⁵. Also ist nach Gleichung (1.4) der Dampfdruck bei 200°C :

$$p(200^\circ\text{C}) = p_0 \cdot e^{\Lambda/R(\frac{1}{20^\circ\text{C}} - \frac{1}{200^\circ\text{C}})} = 2130 \text{ Pa} \quad (2.1)$$

Der atomare Radius von Quecksilber ist⁶ $r = 150 \text{ pm}$, also ist die mittlere freie Weglänge bei 20°C

$$\lambda_{20} = \frac{k_B \cdot 20^\circ\text{C}}{\pi \cdot (150 \text{ pm})^2 \cdot 0,242 \text{ Pa}} = 23,66 \text{ cm} \quad (2.2)$$

und bei 200°C

$$\lambda_{200} = 43 \text{ } \mu\text{m} \quad . \quad (2.3)$$

2.3 Neontriode

Analog zur Quecksilbertriode wurde die U_A/U_B -Charakteristik der Neonröhre durchgemessen:

⁴Charles 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: <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRev.20.259>.

⁵Yiming Zhang, Julian R. G. Evans und Shoufeng Yang. „Corrected Values for Boiling Points and Enthalpies of Vaporization of Elements in Handbooks“. In: *Journal of Chemical & Engineering Data* 56.2 (2011), S. 328–337. DOI: 10.1021/je1011086. eprint: <http://dx.doi.org/10.1021/je1011086>. URL: <http://dx.doi.org/10.1021/je1011086>.

⁶J. C. Slater. „Atomic Radii in Crystals“. In: *The Journal of Chemical Physics* 41.10 (1964), S. 3199–3204. DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.1725697>. URL: <http://scitation.aip.org/content/aip/journal/jcp/41/10/10.1063/1.1725697>.

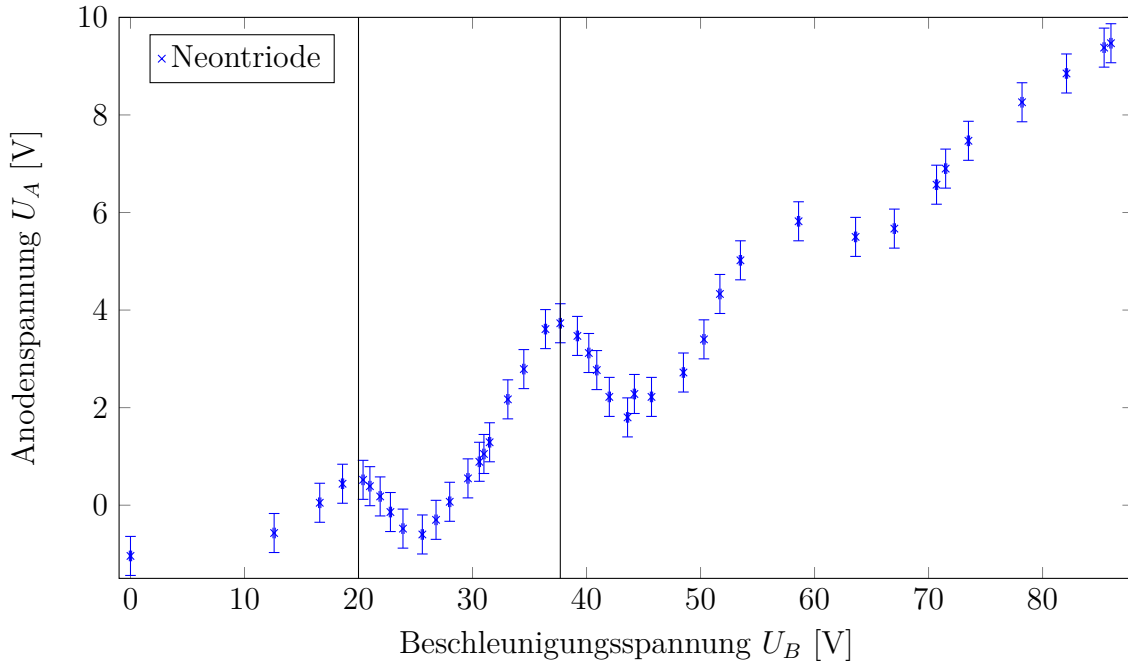


Abbildung 5: U_A/U_B -Charakteristik der Neontriode

Wieder sind die aus der Theorie erwarteten Minima und Maxima zu sehen. Die anhand der eingezeichneten Maxima bestimmte Anregungsenergie beträgt $\Delta E = e \cdot ((37,7 \pm 1,3) \text{ V} - (20,0 \pm 0,4) \text{ V}) = (17,7 \pm 1,7) \text{ eV}$. Würde die gesamte Energie an ein ausgesendetes Photon abgegeben werden, so hätte dieses die Frequenz $\nu = \Delta E/h = 4,28 \cdot 10^{15} \text{ Hz}$, was einer Wellenlänge von $\lambda = c/\nu = 70 \text{ nm}$ entspräche.

3 Diskussion

3.1 Nr. 1 und 2

Die U_A/U_B -Kurve in Abb. 3 ist konsistent mit der mittleren freien Weglänge aus Gleichung (2.2), da diese größer als die Triodenlänge ist, d.h. es kommt (fast) nicht zu Stößen zwischen Elektronen und Gasatomen. Die Anodenspannung steigt monoton an, weil die Elektronen immer stärker beschleunigt werden und somit immer mehr die Anode erreichen. Ab $U_B = 60 \text{ V}$ bleibt die Anodenspannung konstant, da alle aus der Glühkathode austretenden Elektronen die Anode erreichen.

Nach Aufheizen beträgt die mittlere freie Weglänge $\lambda_{200} = 43 \mu\text{m}$, ist also deutlich kleiner als die Triodenlänge. Ein durch die Triode fliegendes Elektron stößt also mehrmals mit Gasatomen zusammen. An der U_A/U_B -Charakteristik in Abb. 4 ist abzulesen, dass diese Stöße nur dann unelastisch sind, wenn die kinetische Energie der Elektronen ΔE übersteigt. Der Wert $\Delta E = (5,0 \pm 0,6) \text{ eV}$ deckt sich innerhalb des Fehlers mit dem wahrscheinlichsten Übergang am Quecksilberatome in den 6p-Zustand (Abb. 6).

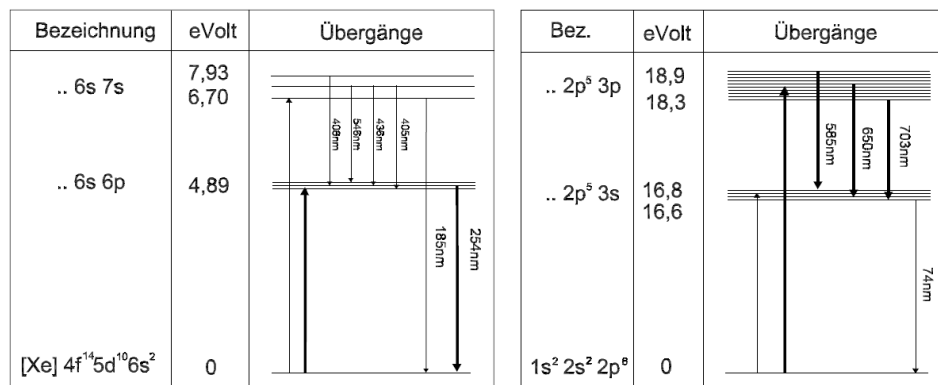


Abbildung 6: Vereinfachte Termschemata von Quecksilber (links) und Neon (rechts). Dicke Pfeile stellen Übergänge mit der größten Wahrscheinlichkeit dar.⁷

Bei der Neonröhre wurden dieselben Beobachtungen gemacht. Auch hier stimmt der gemessene Wert $\Delta E = (17,7 \pm 1,7) \text{ eV}$ im Rahmen des Fehlers mit dem wahrscheinlichsten Übergang in den 3p-Zustand überein.

3.2 Nr. 4

Das emittierte Licht der Neonröhre hat eine Frequenz im sichtbaren Bereich des Lichtes. Dies ist darauf rückzuführen, dass beim zurück „fallen“ des angeregten Elektron in den Grundzustand, Photonen mit unterschiedlicher Wellenlänge erzeugt werden, da bei Neon zwischen Zustände möglich sind. Das Elektron wird in den 3p-Zustand mit einer wahrscheinlichen Anregungsenergie von 18,6 eV angeregt. Bei einer vollständigen Abgabe dieser Energie hätte das Photon eine Wellenlänge von 55,8 nm und wäre damit nicht sichtbar. Das Elektron verliert aber seine Energie in zwei Schritten. Es fällt erst in den 3s-Zustand und anschließend in den Grundzustand. Nach dem Termschemata von Neon entsteht dadurch auch Licht der Wellenlängen 585 nm, 650 nm und 703 nm. Dieses liegt im sichtbaren Spektrum des Lichtes. Bei Quecksilber wurden bis auf Leuchterscheinungen

die auf der Glühkathode zurückzuführen sind, keine periodischen Leuchterscheinungen festgestellt. Bei Neon dagegen schon.

3.3 Nr. 5

Bei Quecksilber ist der am wahrscheinlichste angeregte Zustand der $6s\ 6p$ Zustand. Unter diesem liegt nach dem Quecksilber Termschemata keine weiteren Zustände. Das Elektron fällt in den Grundzustand zurück und die Photonen haben eine Wellenlänge von 185nm oder 254nm. Diese liegen nicht im Spektrum des Lichtes.

Betrachtet man die Ausgangsspannung der Quecksilberdampfampe bei einer Sägezahn-Eigenspannung mit einem Oszilloskop so sieht man die typischen Kurvenverläufe der Franck-Hertz- Röhre. Erhöht man nun die Temperatur der Lampe und damit den Druck so erkennt man am Oszilloskop, dass die Maxima und Minima weniger stark ausgeprägt sind als bei niedriger Temperatur oder sogar verschwinden können. Dies kann damit Begründet werden, dass bei hohem Druck mehr Stoßpartner für die Elektronen vorhanden sind. Damit kommt es zu mehr inelastischen Stößen und einer größeren Streuung der Elektronen im Raum. Die Maxima und Minima werden dadurch abgeschwächt.

Literatur

Dermtröder. *Experimentalphysik 1*. 2008.

Donath, Markus und Anke Schmidt. *Anleitung zu den Experimentellen Übungen zur Optik, Wärmelehre und Atomphysik*. Auflage Sommersemester 2015. Westfälische Wilhelms-Universität Münster. Physikalisches Institut, 2015.

Hill, Charles F. „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: <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRev.20.259>.

Slater, J. C. „Atomic Radii in Crystals“. In: *The Journal of Chemical Physics* 41.10 (1964), S. 3199–3204. DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.1725697>. URL: <http://scitation.aip.org/content/aip/journal/jcp/41/10/10.1063/1.1725697>.

Zhang, Yiming, Julian R. G. Evans und Shoufeng Yang. „Corrected Values for Boiling Points and Enthalpies of Vaporization of Elements in Handbooks“. In: *Journal of Chemical & Engineering Data* 56.2 (2011), S. 328–337. DOI: 10.1021/je1011086. eprint: <http://dx.doi.org/10.1021/je1011086>. URL: <http://dx.doi.org/10.1021/je1011086>.