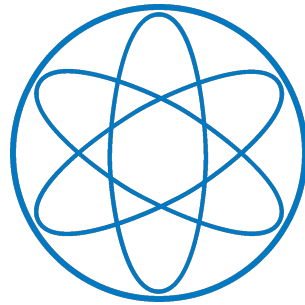


# Anfängerpraktikum Teil 3

## (Optik und Atomphysik)

### Franck-Hertz-Versuch



Kurs 3, Gruppe 1, Team 2:

Eduard Koller

Michael Labenbacher

Fakultät für Physik

Technische Universität München

<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2. Grundlagen</b>	<b>1</b>
<b>3. Experimentelles Vorgehen</b>	<b>2</b>
3.1. Quecksilberröhre . . . . .	2
3.2. Neonröhre . . . . .	3
<b>4. Auswertung der Messergebnisse</b>	<b>4</b>
4.1. Fehlerbetrachtung . . . . .	4
4.2. Quecksilberröhre . . . . .	4
4.3. Neonröhre . . . . .	5
<b>5. Diskussion</b>	<b>6</b>
<b>6. Fragen</b>	<b>6</b>
<b>Anhang</b>	<b>8</b>
<b>A. Messergebnisse und Berechnungen</b>	<b>8</b>
A.1. Quecksilberröhre . . . . .	8
A.2. Neonröhre . . . . .	8
<b>B. Literaturverzeichnis</b>	<b>9</b>

Donnerstag 28. Februar, 2019

## 1. Einleitung

Im Versuch wird gezeigt, dass sich Elektronen auf diskreten Energieniveaus befinden, bei Übergängen von energetisch höheren Zuständen in niedrigere Photonen emittiert werden und die Bindungsenergie der äußersten Elektronen in der Größenordnung von eV liegt. Angemerkt sei, dass Messergebnisse und Fehlerrechnungen dem Anhang zu entnehmen sind.

## 2. Grundlagen

Durch Beschleunigung von freien Elektronen mit einer Beschleunigungsspannung  $U_B$ , also einer Energiezufuhr nach

$$E = e \cdot U_B, \quad (2.1)$$

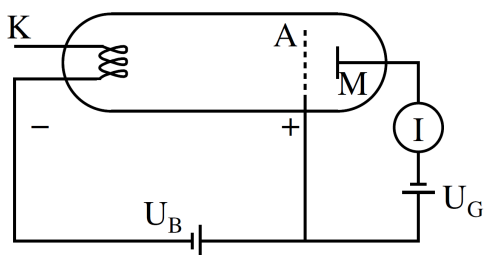
mit der Elementarladung  $e = 1.602\,176\,620\,8(98) \cdot 10^{-19} \text{ C}$ , können diese durch inelastische Stöße gebundene Elektronen auf ein höheres Energieniveau anheben. Dabei sind nur Zustände erlaubt, deren Bahndrehimpuls ein ganzzahliges Vielfaches  $n$  von  $\hbar = h/2\pi$  sind, mit dem Planckschen Wirkungsquantum  $h = 4.135\,667\,662(25) \cdot 10^{-15} \text{ eV s}$ . [1] Übergänge sind somit nur auf ausgezeichneten Bahnen möglich und die Frequenz  $\nu$  der abgestrahlten Photonen, Emission einer Spektrallinie, ist mit den Energiezuständen der Bahnen vorher  $E_2$  und nachher  $E_1$  über

$$h \cdot \nu = E_2 - E_1 = \Delta E \quad (2.2)$$

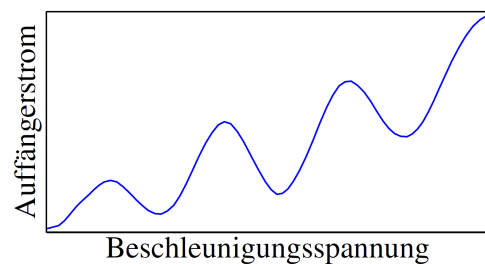
verknüpft. Im Vakuum gelten die Zusammenhänge

$$E = h \cdot \nu \quad \nu \cdot \lambda = c \quad (2.3)$$

für Energie  $E$ , Frequenz und Wellenlänge  $\lambda$  vom Photon.



a. Prinzip des Versuchsaufbaus.



b. Strom-Spannungs-Kennlinie.

**Abbildung 2.1.:** Franck-Hertz-Versuch [2]

Das Grundkonzept des Franck-Hertz-Versuches ist in [Abbildung 2.1](#) skizziert. Die Spannung  $U_B$  zwischen Glühkathode K und Anode A dient zur Beschleunigung der von K (Heizspannung  $U_H$ ) abgestrahlten Elektronen. Diese stoßen bzw. streuen mit den zwischen K und A befindlichen Atomen und treten durch das Anodengitter hindurch. Besitzen die Elektronen genügend Energie um die Gegenspannung  $U_G$  zwischen A und Auffängerelektrode M zu überwinden, so wird ihre Stromstärke  $I$  gemessen. Erhöht man die Energie der Elektronen, so steigt am

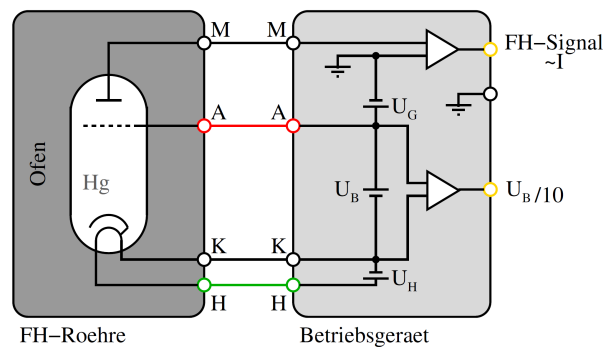
Beginn der registrierte Strom bis die Energie der Elektronen der Anregungsenergie des Gases entspricht und ein gebundenes Elektron in ein höheres Energieniveau gehoben werden kann. Die Elektronen verlieren bei diesen inelastischen Stößen diesen diskreten Energiebetrag, können die Gegenspannung nicht mehr überwinden und der Auffängerstrom sinkt. Es wird nach einem Maxima bei zunehmender Spannung der Auffängerstrom also kleiner, da die Zone vor der Anode, in der inelastische Stöße stattfinden, größer wird und weil bei Erhöhung der überschüssigen Energie die Wahrscheinlichkeit für inelastische Stöße wächst. Analog für mehrere inelastische Stöße und es folgt die charakteristische Franck-Hertz-Kennlinie zwischen Auffängerstrom und Beschleunigungsspannung in [Abbildung 2.1.b](#).

Im 1. Versuchsteil wird Quecksilber (Hg) verwendet. Im Grundzustand, niedrigster Energie, sind die Energieniveaus aufgefüllt, bis zur N-Schale (Hauptquantenzahl  $n = 4$ ), die O-Schale ( $n = 5$ ) ist mit 18 Elektronen nicht vollständig besetzt und in der P-Schale ( $n = 6$ ) befinden sich zwei (Valenz-)Elektronen, welche die Spektraleigenschaften von Hg bestimmen. Ein vereinfachtes Anregungsschema findet sich in der Anleitung [2]. Bei Elektronenstoßanregung können vom Grundzustand aus alle Zustände, mit unterschiedlichen Wahrscheinlichkeiten, angeregt werden, wobei bei optisch erlaubten, das Atom fast spontan wieder in den Grundzustand fällt, unter Emission eines Photons.

Im 2. Abschnitt wird Neon, mit zehn Elektronen in der Hülle im neutralen Zustand, verwendet. In der Versuchsbeschreibung [2] ist analog zum Quecksilber ein Anregungsschema skizziert und es lässt sich erkennen, dass bei einem Elektronenstoß bevorzugt Zustände im Bereich zwischen 18.3 eV und 18.9 eV angeregt werden. Die Atome gehen dabei nicht sofort wieder in den Grundzustand über, und senden Licht im sichtbaren Bereich zwischen gelb und rot aus.

### 3. Experimentelles Vorgehen

#### 3.1. Quecksilberröhre



**Abbildung 3.1.:** Schaltplan des Franck-Hertz-Versuchs mit Quecksilber (Hg) [2]

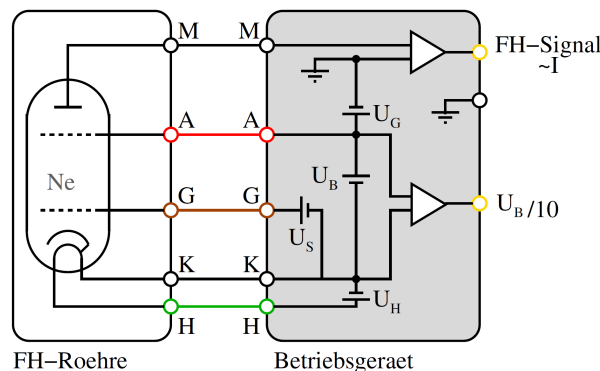
Nach dem Aufbau der in [Abbildung 3.1](#) dargestellten Schaltung ist die Röhre auf ca. 200 °C zu erhitzen, Messung mit dem Digitalthermometer GTH 1170. Gute Messergebnisse werden bei einem Quecksilberdampfdruck von 1 bis 2 hPa erzielt. Ein Oszilloskop (Tektronix TDS1001B)

dient zur Aufnahme im  $x$ - $y$ -Betrieb von der Beschleunigungsspannung (CH1) und des zum Auffängerstromes proportionalen Spannungssignales (CH2). Am Beginn wird der Schalter von  $U_B$  am Betriebsgerät eingeschalten und die Beschleunigungsspannung wächst linear von 0 bis zum Maximalwert<sup>1</sup> in 10 ms, bleibt danach 10 ms auf 0 und dieser Vorgang wiederholt sich mit einer Frequenz von 50 Hz. Mit dem Betriebsgerät lassen sich die Heiz-, Gegen- und Beschleunigungsspannung variieren, so dass am Oszilloskop die charakteristische Franck-Hertz-Kurve mit mindestens vier ausgeprägten Minima und Maxima erkennbar ist.

Im Anschluss auf die Kalibrierung ist die eingestellte Gegenspannung mit einem Digitalmultimeter (Votcraft VC120) zu messen und die Beschleunigungsspannung wird nun per Hand geregelt. Die Spannungen, bei denen sich die Maxima bzw. Minima des Auffängerstromes befinden, können mit Hilfe des Multimeters so genau wie möglich bestimmt werden, indem gleichzeitig auf dem Oszilloskop die Kurve nachverfolgt und bei dem Extrema die anliegende Beschleunigungsspannung am Multimeter abgelesen wird.

### 3.2. Neonröhre

Die Durchführung des Versuches erfolgt analog zum [Abschnitt 3.1](#) mit Quecksilber, wobei der Neongasdruck in der Röhre einige hPa beträgt und die Heizung entfällt. Die Beschaltung zwischen Röhre und Betriebsgerät ist in [Abbildung 3.2](#) dargestellt und zusätzlich existiert ein Streugitter im Abstand von ca. 2 mm zur Kathode. Der Abstand vom Anoden- und Streugitter beträgt ca. 5 mm und zwischen Anode und Auffänger liegen etwa 2 mm.



**Abbildung 3.2.:** Schaltplan des Franck-Hertz-Versuchs mit Neon [2]

Der Maximalwert der Beschleunigungsspannung liegt bei 80 V und analog zur Quecksilber-Röhre in 3.1 ist eine Franck-Hertz-Kurve, durch Variation der Heiz- und Gegenspannung, mit drei ausgeprägten Minima und Maxima am Oszilloskop darzustellen. Im Anschluss auf die Messungen von  $U_B$  bei den Extrema sind die in der Röhre beobachtbaren Spektrallinien mit einem Taschenspektroskop zu messen. Dabei muss dieses zuvor mit einer Natriumleuchte (D-Linie) geeicht werden und Streulichter sind zu unterdrücken.

<sup>1</sup>Bei Quecksilber darf  $U_B$  den Wert 45 V nicht überschreiten, ansonst kommt es zu Gasionisation im Quecksilber und das gewünschte Ergebnis kann nicht erzielt werden.

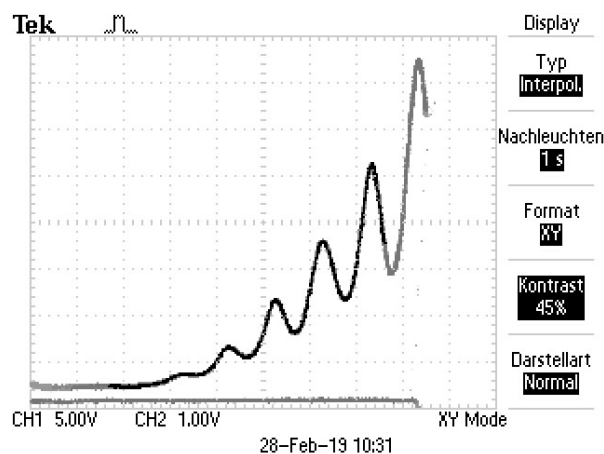
## 4. Auswertung der Messergebnisse

### 4.1. Fehlerbetrachtung

Bei der Temperaturmessung wurde aus den Beobachtungen eine statische Schwankung von 5 % über die gesamte Messdauer geschätzt und eine systematische Unsicherheit auf Grund der Genauigkeit von 0.2 % berücksichtigt. Das Digitalmultimeter für Gegen- und Beschleunigungsspannung hatte eine Auflösung von 1 mV bzw. 10 mV, Reproduzierbarkeitsfehler von 2 digit und eine Genauigkeit von 0.5 % im Messbereich 2000 mV bzw. 20 V. Zusätzlich wurde bei der Beschleunigungsspannung eine statistische Unsicherheit von 1 digit (Quecksilber) bzw. 10 digit (Neon) mit einkalkuliert, da die Bestimmung der Extrema am Oszilloskop einen dementsprechenden Spielraum lieferte. Bei der Fortpflanzung auf die Differenzspannung der Maxima bzw. Minima wurde der Genauigkeitsfehler als linearer Skalierungsfehler betrachtet und ist somit relativ zum statistischen klein.

### 4.2. Quecksilberröhre

Zur Bestimmung der Strom-Spannungs-Kennlinie wurde die Röhre auf eine Betriebstemperatur von  $(209 \pm 11)^\circ\text{C}$  aufgeheizt und eine Gegenspannung  $U_G$  von  $(1.739 \pm 0.011)\text{ V}$  angelegt. Die sich ergebende Kennlinie für Quecksilber ist in [Abbildung 4.1](#) dargestellt.



**Abbildung 4.1.:** Oszilloskop-Aufnahme im  $x$ - $y$ -Betrieb des Franck-Hertz-Versuches mit Quecksilber. Auf der  $x$ -Achse durchläuft die Beschleunigungsspannung im „Sägezahn“-Betrieb linear ihren Wertebereich von 0 bis ca. 45 V und die  $y$ -Achse entspricht dem zum Auffängerstrom proportionalen Spannungssignal. Es lässt sich eine Spannungsdifferenz zwischen Maxima bzw. Minima von ca. 5 V erkennen.

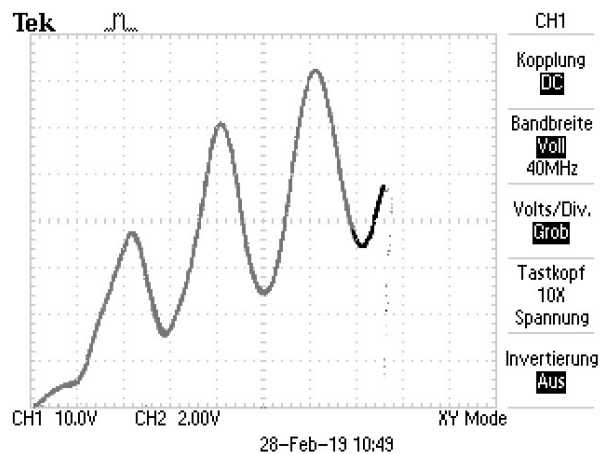
Die gemessenen Werte für die Maxima und Minima der Beschleunigungsspannung befinden sich im [Abschnitt A.1](#). Unter Mittelwertbildungen und Berechnung der Differenz zweier benachbarter Maxima bzw. Minima erhält man die gesuchte Energiedifferenz von zwei Energieniveaus des Quecksilberatoms und mit [Gleichung \(2.3\)](#) die diesem Übergang zugehörige Wellenlänge. Die Ergebnisse nach Mittelwertbildung finden sich in [Tabelle 4.1](#).

**Tabelle 4.1.:** Energiedifferenz (Spannung) und Wellenlänge beim Franck-Herz-Versuch für Quecksilber

	$\Delta U_B$ V	$\Delta(\Delta U_B)$ V	$\lambda$ nm	$\Delta\lambda$ nm
Experimentell	5,23	0.12	237	6
Theoretisch	4,9		253,7	

### 4.3. Neonröhre

Bei Neon war kein Aufheizenvorgang der Röhre notwendig und wir haben eine Gegenspannung von  $U_G = (1.300 \pm 0.009) \text{ V}$  angelegt. Die sich ergebende Oszilloskop-Aufnahme für Neon ist in [Abbildung 4.2](#) dargestellt.



**Abbildung 4.2.:** Oszilloskop-Aufnahme im  $x$ - $y$ -Betrieb des Franck-Herz-Versuches mit Neon. Auf der  $x$ -Achse durchläuft die Beschleunigungsspannung im „Sägezahn“-Betrieb linear ihren Wertebereich von 0 bis ca. 80 V und die  $y$ -Achse entspricht dem zum Auffängerstrom proportionalen Spannungssignal. Es sind drei ausgeprägte Maxima und Minima erkennbar und der Abstand zweier Maxima liegt in der Größenordnung der benötigten Anregungsenergien von Neon.

Analog zur Röhre mit Quecksilber befinden sich die Messwerte im [Abschnitt A.2](#) und die Berechnungen mit der [Formel \(2.3\)](#) liefert die gesuchte Energiedifferenz zweier Energieniveaus des Neonatoms. Die Ergebnisse finden sich in [Tabelle 4.2](#).

**Tabelle 4.2.:** Beschleunigungsspannung beim Franck-Herz-Versuch für Neon

	$\Delta U_B$ V	$\Delta(\Delta U_B)$ V
Experimentell	19,7	0.7
Theoretisch	18,3 – 18,9	

Betrachtete man den Bereich zwischen den beiden Gittern, so konnte man nach dem Durchlauf des ersten Strommaximas eine leuchtende Schicht erkennen. Weitere Erhöhung der Be-

beschleunigungsspannung lieferten sichtbare drei übereinander liegende Leuchtschichten. Die mit dem Taschenspektroskop beobachteten Spektrallinien und deren Wellenlängen bei ca. 80 V Beschleunigungsspannung finden sich in [Tabelle 4.3](#).

**Tabelle 4.3.:** Gemessene Wellenlängen für Neon mit  $\Delta\lambda = 10 \text{ nm}$

Wellenlänge	595nm	628nm	655nm
Wahrgenommene Farbe	orange	hellrot	rot

## 5. Diskussion

Für Quecksilber stimmt die berechnete Wellenlänge in der [Tabelle 4.1](#) innerhalb der Unsicherheiten nicht mit dem theoretischen Wert überein, ist zu gering und kann auf die verwendete Methode rückgeführt werden, da der Mittelwert der Spannungsdifferenzen der Maxima bzw. Minima nur eine gute Näherung für den wahren Wert der kleinsten Anregungsenergie von 4.9 V darstellt. Betrachtet man die Messwerte, erkennt man, dass mit zunehmender Ordnung der Maxima bzw. Minima die Abstände zunehmen. Dies kann unter anderem auf weitere mögliche Übergänge in höhere Energieniveaus zurückgeführt werden und des Weiteren ist der angegebene lineare Zusammenhang vom Auffängerstrom zur ausgegebenen Spannung, sowie der innere Aufbau der Röhre und des Betriebsgeräts unbekannt.

Für Neon kann mit analoger Begründung die Diskrepanz erklärt werden. Bei Abregung des Atoms waren mehrere Spektrallinien erkennbar, welche genau zu erwarten sind, bis auf das gegebene Anregungsschema, nicht näher bekannt. Die Wellenlängen der beobachteten Linien liegen im Toleranzbereich zu theoretisch erwarteten, die orange Spektrallinie war deutlich ausgeprägt und es kann vermutet werden, dass sie dem theoretischen Wert von 585.2 nm entspricht.

## 6. Fragen

### 1. Was versteht man unter einem elastischen und einem inelastischen Stoß?

Während eines elastischen Stoßprozesses bleibt die Energie, Impuls und Identität der Stoßpartner erhalten. Beim inelastischen Stoß gibt das einfallende Elektron in diskreten Mengen Energie ab und regt ein Elektron des Atoms an, welches in ein höheres Energieniveau gehoben wird.

### 2. Warum kann ein Elektron mit einer Energie $< 4.9 \text{ V}$ nur einen elastischen Stoß mit einem Atom (Hg) machen?

Wie man im Anregungsschema des Hg-Atoms [2] erkennt, ist die minimale Anregungsenergie ca. 4.9 V. Da das Atom nur diskrete Energiemengen zur Anregung der Elektronen aufnimmt und die kinetische Energie des Elektrons kleiner als die Mindestenergie ist, werden nur elastische Stöße ausgeführt.

**3. Warum kann ein Elektron bei einem elastischen Stoß mit einem Atom nur wenig Energie übertragen?**

Bei der Rutherford-Streuung von einem geladenen Teilchen 1 (Elektron) am Atom (Teilchen 2) ist die relative Energieänderung in der Größenordnung  $\mathcal{O}(m_1/m_2)$ , falls  $m_1 \ll m_2$  ist. D. h. die Energieübertragung ist in diesem Fall sehr klein.

**4. Wie gibt das durch einen inelastischen Stoß angeregte Atom seine Energie ab?**

Das Elektron im angeregten Energiezustand fällt in einen energetisch niedrigeren Zustand, wodurch ein Photon mit der Energiedifferenz abgestrahlt wird.

**5. Welcher Unterschied besteht zwischen der Anregung eines Atoms durch Elektronen bzw. Lichtquanten?**

Ein Photon wird vollständig absorbiert, falls die Energie dessen gleich, innerhalb der Unschärferelation, der Energiedifferenz der Energieniveaus ist. Bei der Anregung des Atoms durch ein Elektron verlieren diese so viel Energie, wie zur Anregung notwendig ist, die restliche behalten sie als kinetische Energie.

**6. Warum wird zwischen Auffängerelektrode und Anodengitter eine Bremsspannung benötigt?**

Wäre keine Bremsspannung vorhanden, so würde man einen relativ konstanten Strom erhalten, da auch die Elektronen die inelastischen Stöße durchführen an der Auffängerelektrode ankommen würden.

**7. Vergleichen Sie die Funktionsweise einer Franck-Hertz-Röhre mit der einer Leuchtstofflampe und versuchen Sie, die Leuchtstofflampe anhand des Prinzipschaltbildes in der Versuchsbeschreibung [2] (Abbildung 7) zu verstehen. Warum heißen diese Lampen Leuchtstofflampen?**

Beim Schließen des Starters baut sich ein Stromfluss durch diesen und der Drosselspule auf. Durch abruptes Unterbrechen des Stromes wird durch Selbstinduktion eine hohe Spannung induziert und die durch den zuvor fließenden Stromfluss aufgeheizte Leuchtstoffröhre zündet, da die Gasfüllung in der Röhre ionisiert und somit leitfähig wurde. Analog zum Franck-Hertz-Versuch regen die freien Elektronen Atomelektronen an, welche im Anschluss wieder in den Grundzustand zurück fallen und dabei Photonen emittieren. Meistens benutzt man für Leuchtstoffröhren Quecksilber, welches im ultravioleten Bereich abstrahlt. Um sichtbares Licht zu erhalten bringt man eine fluoreszierende Leuchtschicht auf der Aushülle der Leuchtstoffröhre an.

**8. Was ist der Unterschied zu einer Röntgenröhre?**

In einer Röntgenröhre werden aus der Kathode ausgelöste Elektronen durch eine Beschleunigungsspannung zur Anode bewegt. Zwischen den Elektroden befindet sich Vakuum und die auf der Anode auftreffenden Elektronen werden abgebremst, schlagen Elektronen aus den Atomen des Anodenmaterials und durch Streuung an den Atomkernen entsteht Bremsstrahlung. Ein wesentlicher Unterschied liegt darin, dass die Wellenlänge bei der Röntgenröhre kürzer ist, was an der höheren Energie liegt.



## A. Messergebnisse und Berechnungen

### A.1. Quecksilberröhre

**Tabelle A.1.:** Messergebnisse der Beschleunigungsspannungen  $U_B/10$  beim Franck-Hertz-Versuch mit Quecksilber (zwei Versuchsreihen).

Maxima		Minima	
V	V	V	V
2.72	2.71	2.92	2.92
3.22	3.24	3.45	3.45
3.73	3.76	3.95	3.96
4.27	4.27	4.50	4.50

Die Fehlerrechnung für die Differenz  $\Delta U_B$  zwischen Maxima bzw. Minima von der Beschleunigungsspannung erfolgte durch getrennte Fortpflanzung, Mittelwertbildung und der Student-t-Verteilung ( $t_{\text{Student}} = 1.11$ ). Für die Wellenlänge ergibt sich nach [Gleichung \(2.3\)](#) und (2.2):

$$\Delta\lambda = \frac{hc}{e\Delta U_B^2} (\Delta(\Delta U_{B,\text{stat}}) + \Delta(\Delta U_{B,\text{syst}}))$$

### A.2. Neonröhre

**Tabelle A.2.:** Messergebnisse der Beschleunigungsspannungen  $U_B/10$  beim Franck-Hertz-Versuch mit Neon (zwei Versuchsreihen).

Maxima		Minima	
V	V	V	V
2.07	2.03	2.82	2.68
3.87	3.96	4.75	4.71
5.84	5.84	6.78	6.86

Fehlerfortpflanzung analog zum [Abschnitt A.1](#) ( $t_{\text{Student}} = 1.2$ ) und die Ergebnisse der Spektrallinienmessung sind in [Tabelle A.3](#) angeführt.

**Tabelle A.3.:** Wellenlängen der beobachteten Spektrallinien beim Franck-Hertz-Versuch mit Neon (zwei Messreihen).

nm	nm
590	600
625	630
655	655

## B. Literaturverzeichnis

- [1] CODATA. *Fundamentale Naturkonstanten*. 1994. URL: <https://physics.nist.gov/cuu/Constants/index.html> (besucht am 28. Februar 2019) (siehe S. 1).
- [2] *Frack-Hertz-Versuch (FHV)*. 2019. URL: <https://www.ph.tum.de/academics/org/labs/ap/ap3/FHV.pdf> (besucht am 27. Februar 2019) (siehe S. 1–3, 6–7).