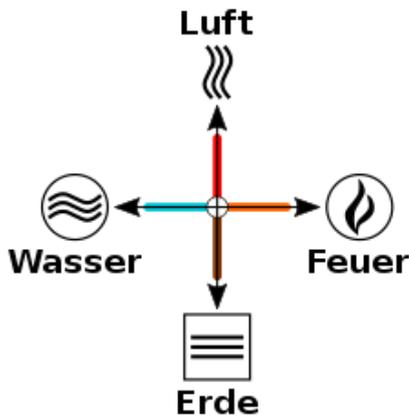


Lösungen zu den tet.folio-Aufgaben im Kapitel „Franck-Hertz-Versuch“

Die nachfolgenden Lösungen richten sich in erster Linie an Lehrkräfte. Es sind daher nicht in allen Fällen ausführliche Lösungen angegeben.

• Entwicklung der Atommodelle

Antwortbox 1: Kontinuumstheorie / Vier-Elemente-Lehre



1PS2801 (Transferred by PS2801), Public domain, via Wikimedia Commons

Die Vier-Elemente Lehre, die sich schrittweise in der griechischen Philosophie bei Überlegungen zur Existenz einer hypothetischen Ursubstanz entwickelte, bildet die Grundlage der Aristotelischen Lehre zum Aufbau aller Materie. Danach sollte alles Sein aus den Elementen Luft, Wasser, Erde und Feuer bestehen. Welche Stoffe sich dabei ergaben, sollte von der Zusammensetzung dieser vier Elemente abhängen. Die jeweilige Art der ersten drei Elemente erinnert an das Konzept der Aggregatzustände, das Element Feuer an das Konzept Energie.

Die Kontinuumstheorie von Aristoteles geht davon aus, dass alle Dinge immer weiter unterteilbar sind, dass also keine kleinsten Teilchen eines Stoffes existieren. Einen leeren Raum kann es seiner Meinung nach nicht geben, da der Raum gerade durch die Anwesenheit eines Körpers bestimmt ist. Einen leeren Raum könnte die Natur nicht ertragen und würde diesen sofort wieder mit Materie füllen (horror vacui – die Angst vor der Leere).

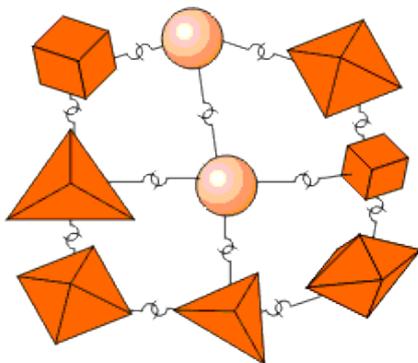
Quellen:

<http://www.naturphilosophie.org/atom-2/>

<https://www.leifiphysik.de/atomphysik/atomaufbau/geschichte/entwicklung-der-atomvorstellung>

[https://de.wikipedia.org/wiki/Raum_\(Philosophie\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Raum_(Philosophie))

Antwortbox 2: Demokrit: Eigenschaften des Modells, was kann es erklären?



Entwickelt ca. um 400 v. Chr.

Von Demokrit (460/459–circa 400/380 v. Chr.) und seinem Lehrer Leukipp stammt der Begriff Atom. Nach Demokrit sollte alle Materie aus kleinsten Teilchen, den Atomen bestehen. Atome sollten unveränderlich und absolut undurchdringlich sein. Sie kommen in sehr verschiedenen Formen vor und bewegen sich im leeren Raum. Sämtliche Stoffe und ihre Eigenschaften entstehen durch wechselnde Zusammensetzungen der Atome und deren

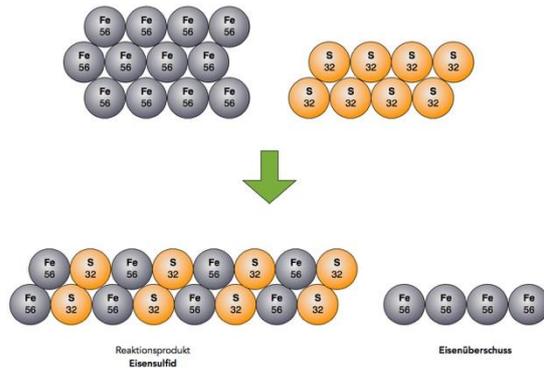
Einwirkungen auf unsere Sinnesorgane.

Mit diesem Atommodell konnte einerseits die Vielfalt der Stoffe und andererseits die Gleichheit von Stoffen erklärt werden.

Quellen:

<http://www.naturphilosophie.org/atom-2/>

Antwortbox 3: Dalton: Eigenschaften des Modells, was kann es erklären?



Entwickelt im Jahre 1808.

Dalton entwickelte sein Atommodell zu Anfang des 19. Jahrhunderts.

Wahrscheinlich stellte er sich Atome als winzige Kugelteilchen vor. Wesentliche Aussagen des Modells sind folgende:

- Atome unterschiedlicher Elemente unterscheiden sich in ihrer Größe und Masse. Die Atome eines Elements sind gleich. Es gibt genauso viele

2 erstellt von Ulrich Helmich

Atomarten, wie es Elemente gibt.

- Atome können nicht geteilt, erzeugt oder vernichtet werden.
- Bei einer chemischen Reaktion werden die Atome der Ausgangsstoffe neu angeordnet und in bestimmten Anzahlverhältnissen miteinander verbunden.

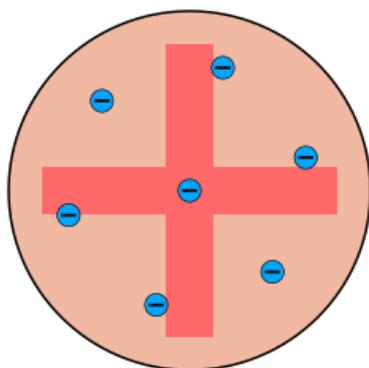
Dalton konnte mit seinem Modell erklären, dass bei einer chemischen Reaktion Stoffumwandlungen stattfinden. Bei der Reaktion zweier Stoffe zu einem dritten sind immer die gleichen Massenverhältnisse beteiligt.

Quellen:

<https://uol.de/chemiedidaktik/materialien/lerneinheit-zur-einfuehrung-des-differenzierten-atommodells/einheit-fuer-die-sekundarstufe-i/baustein-1-das-daltonsche-atommodell>

<https://www.u-helmich.de/che/0809/00-einf/einf04.html>

Antwortbox 4: Thomson: Eigenschaften des Modells, was kann es erklären?



Entwickelt im Jahre 1903

Nach dem Thomson'schen Modell sind negativ geladene Elektronen statisch in eine gleichmäßig verteilte positive Matrix eingebettet, ähnlich wie die Rosinen in einem Rosinenkuchen (deshalb auch Rosinenkuchenmodell). Die Masse des Atoms sollte im Wesentlichen bestimmt sein durch die Masse der Elektronen.

Mit dem Modell lassen sich Phänomene wie Vorgänge in Gasentladungsröhren erklären, bei denen Gase unter dem Einfluss einer hohen Spannung in negative

Kathodenstrahlen und positive Kanalstrahlen getrennt werden. Atome müssen also aus

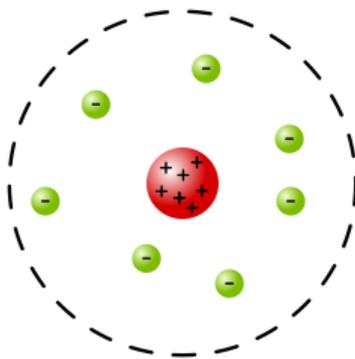
positiven und negativen Bestandteilen aufgebaut sein. Mit seinem Rosinenkuchenmodell konnte Thomson eine Möglichkeit darstellen, wie sich positive und negative Ladungen innerhalb eines Atoms in einem statischen Gleichgewicht befinden können.

Quelle:

https://de.wikipedia.org/wiki/Thomsonsches_Atommodell

<https://www.leifiphysik.de/atomphysik/atomaufbau/geschichte/entwicklung-der-atomvorstellung>

Antwortbox 5: Rutherford: Eigenschaften des Modells, was kann es erklären?



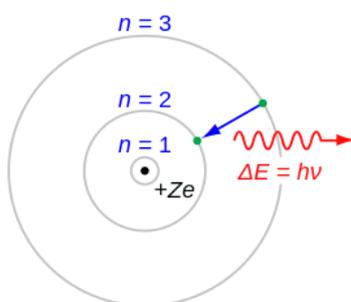
Entwickelt in den Jahren 1909-1911

Nach dem Rutherford'schen Atommodell existiert ein winziger, positiv geladener Kern, der fast die komplette Masse des Atoms enthält. Der Kern ist von Elektronen umgeben, die sich ähnlich wie Planeten auf Bahnen bewegen. Die Bahnen der Elektronen bestimmen die Größe eines Atoms.

Das Modell kann erklären, wo im Atom sich positive und negative Teilchen befinden und wie die Dichte innerhalb

eines Atoms variiert.

Antwortbox 6: Bohr: Eigenschaften des Modells, was kann es erklären?



Entwickelt im Jahre 1913

Ausgehend vom Rutherford'schen Atommodell fordert das Bohr'sche Modell, dass sich Elektronen auf bestimmten Energieniveaus in stabilen Kreisbahnen um den Kern bewegen, ohne dabei elektromagnetische Strahlung abzugeben. Ein Wechsel zwischen diesen Bahnen ist möglich und stets mit der Abgabe oder Aufnahme eines Photons verbunden. Die Energie dieses

Photons entspricht der Differenz der Energieniveaus zwischen zwei Bahnen.

Das Bohr'sche Modell macht Annahmen zur Existenz stabiler, erlaubter Elektronenbahnen und erweitert damit das Rutherford'sche Modell. Mit dem Bohr'schen Modell lässt sich die Absorption und Emission von Licht durch Atome (quantitativ genau jedoch nur für Wasserstoff) erklären.

Antwortbox 7: Aussagen der verschiedenen Atommodelle

 <p>Demokrit (Quelle: Wikipedia)</p>	Atome sind die kleinsten, unzerlegbaren Bestandteile der Materie, die je nach Kombination die unterschiedlichen Stoffe bilden.	Die makroskopischen Körper und ihre wahrnehmbaren Eigenschaften entstehen durch die Zusammensetzung der Atome und deren Einwirkungen auf unsere Sinnesorgane.
 <p>John Dalton (Quelle: Wikipedia)</p>	Elemente bestehen aus für das jeweilige Element charakteristischen, in sich gleichen und unteilbaren Teilchen, den Atomen, die sich je nach Element durch ihre Masse unterscheiden.	Bei chemischen Reaktionen werden die Atome der Ausgangsstoffe nur neu angeordnet und in bestimmten Anzahlverhältnissen miteinander verbunden.
 <p>J. J. Thomson (Quelle: Wikipedia)</p>	Ein Atom besteht aus gleichmäßig verteilter positiver Masse, in der sich die negativ geladenen Elektronen bewegen.	Atome sind nicht unteilbar, sondern sie bestehen aus positiven und negativen Teilchen.
 <p>Ernest Rutherford (Quelle: Wikipedia)</p>	"Es war beinahe so unglaublich, als ob man mit einem 15-Zoll-Geschoss auf ein Taschentuch schießt und das Geschoss zurückkommt und einen selbst trifft."	
 <p>Niels Bohr (Quelle: Wikipedia)</p>	"As soon as I saw Balmer's formula, the whole thing was immediately clear to me." (Sobald ich Balmers Formel sah, war mir die ganze Sache sofort klar.)	Elektronen in Atomen verhalten sich anders, als bestimmte Regeln der Elektrodynamik dieses fordern.

Anmerkungen:

Demokrit: Einfachstes Modell zur Erklärung der Vielfalt der Stoffe. Als Besonderheit sollten die Atome eines Körpers Einwirkungen auf unsere Sinnesorgane haben.

Rutherford: Das Zitat bezieht sich darauf, dass Alphateilchen vom Atomkern in die Ausgangsrichtung zurückreflektiert werden können. Das wäre nach dem Thomson'schen Modell wegen der geringen Dichte des „Rosinenkuchens“ unmöglich.

• Allgemeine Informationen zum Franck-Hertz-Versuch

Antwortbox 1: Bauteile der Franck-Hertz-Röhre



Antwortbox 2: Zusammenhang Skizze und Franck-Hertz-Röhre

Die Original Franck-Hertz-Röhre ist im Gegensatz zur Prinzipskizze rotationssymmetrisch aufgebaut. Die Heizspannung mit dem Absauggitter findet in der Mitte des Aufbaus. Das Beschleunigungsgitter ist ein Zylinder, welcher das Absauggitter umschließt, ohne dies zu berühren. Die Auffängerelektrode ist ein weiterer, noch etwas größerer Zylinder, welcher sich über den restlichen Elektroden befindet. D.h. die Prinzipskizze stellt einen Querschnitt durch die (halbe) Original Franck-Hertz-Röhre dar.

- **Franck-Hertz-Versuch mit Hg – Messwertaufnahme mit Multimeter**

Antwortbox 1: Aufbau der Röhre und Funktion der Bauelemente

Ganz links in der Schaltskizze ist der Heizdraht zu erkennen, aus dem durch den glühelektrischen Effekt Elektronen freigesetzt werden. Durch die Absaugspannung am Gitter 1 werden die freigesetzten Elektronen ein Stück von der Elektrode entfernt. Die regelbare Beschleunigungsspannung, die zwischen dem Gitter 1 und Gitter 2 anliegt, beschleunigt die Elektronen. Nachdem die Elektronen das Gitter 2 passiert haben, werden sie durch die Gegenspannung, die zwischen dem Gitter 2 und der Auffängerelektrode angelegt ist, abgebremst. Die Elektronen, die die Auffängerelektrode erreichen, fließen ab. Dieser Anodenstrom wird über einen Messverstärker gemessen.

Antwortbox 2: Ziel von Franck und Hertz

Franck und Hertz wollten mit ihren Versuchsaufbau die Ionisierungsenergie von Quecksilber bestimmen

Antwortbox 3: Begründungen

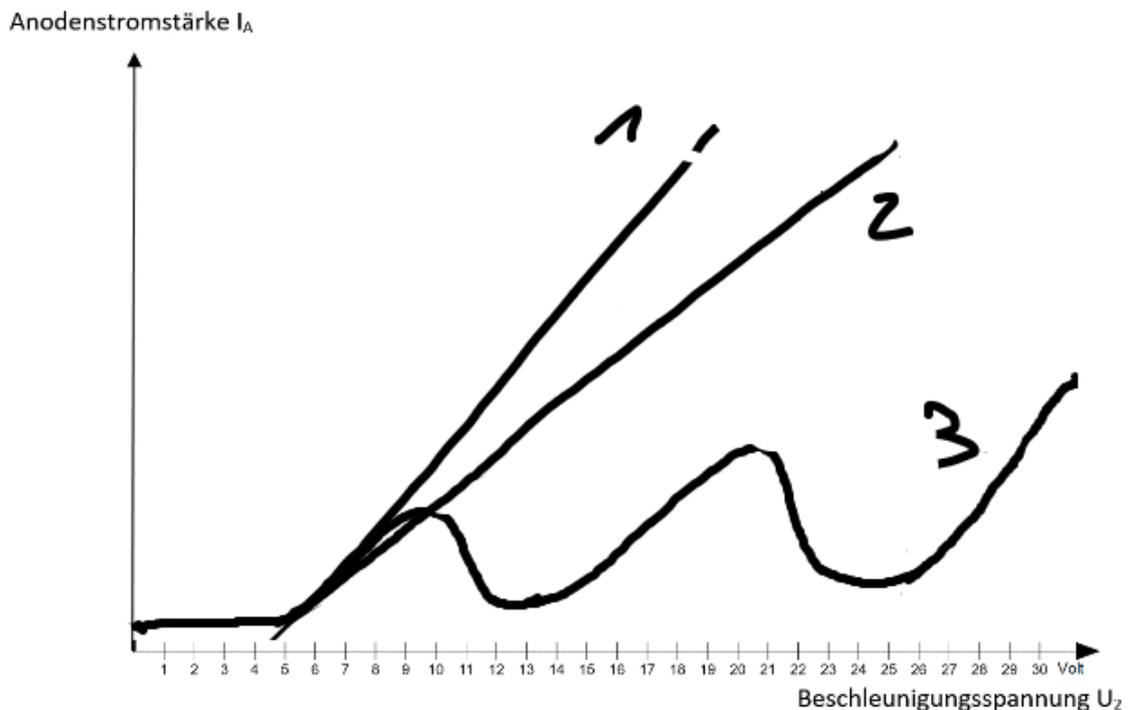
Mögliche Begründungen könnten sein:

Für alle drei Szenarien gilt: Bis zu einer Beschleunigungsspannung von 3 V kommen keine Elektronen an der Auffängerelektrode an, da die Summe der Absaugspannung und der Beschleunigungsspannung kleiner als die Gegenspannung ist und dadurch alle Elektronen abgebremst werden und in Richtung Gitter 2 umkehren.

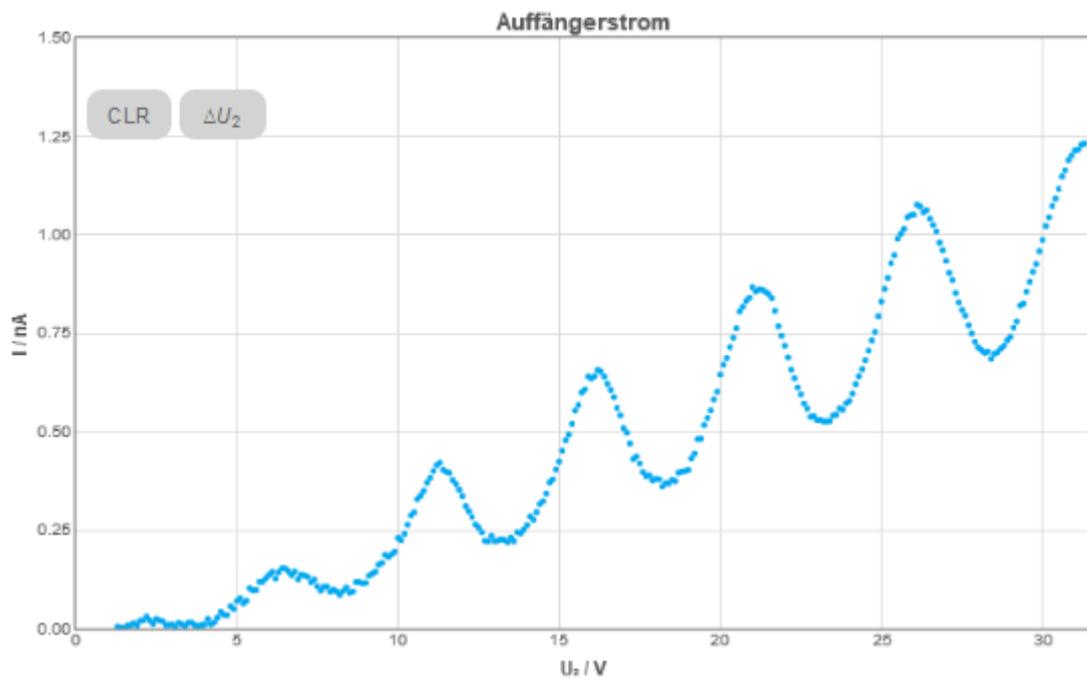
Vakuum: Je größer die Beschleunigungsspannung, desto mehr Elektronen kommen pro Sekunde an der Auffängerelektrode an. D.h. die Anodenstromstärke wird mit zunehmender Beschleunigungsspannung immer größer

Nur elastische Stöße: Die Elektronen werden z.T. auf dem Weg zur Auffängerelektrode (immer wieder) durch elastische Stöße zurückgestoßen. Somit kommen bei gleicher Beschleunigungsspannung weniger Elektronen an als im Vakuum, die Anzahl der Elektronen, somit auch die Anodenstromstärke, nimmt aber weiterhin mit wachsender Beschleunigungsspannung zu,

Elektronen ionisieren Hg-Atome: Die Elektronen würden beschleunigt werden und wenn sie eine kinetische Energie von 10,4 eV erreicht hätten, würden sie durch einen unelastischen Stoß die Hg-Atome ionisieren und ihre kinetische Energie abgeben. Dann hätten sie nicht mehr genug Energie, um die Gegenspannung zu überwinden, der Anodenstrom würde abfallen. Wenn Sie mit mehr Energie als $10,4 \text{ eV} + U_G$ beschleunigt werden, würde ihre Energie ausreichen, dass Gegenfeld zu überwinden und der Anodenstrom würde wieder ansteigen. Wenn sie dann eine Energie von 20,8 eV (bzw. $n \cdot 10,4 \text{ eV}$) hätten, könnten sie zwei (bzw. n) Hg-Atome ionisieren.



Antwortbox 4: Tatsächlicher Verlauf



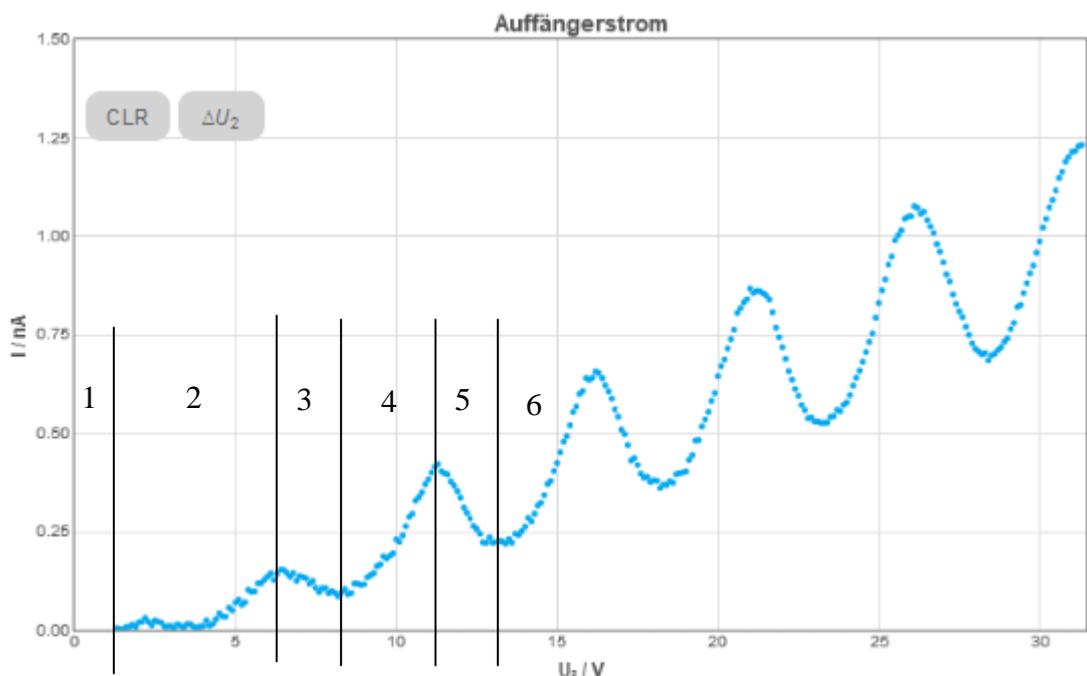
Die Kurve zeigt ein ähnliches Ansteigen und Abfallen an, wie es sich bei der Annahme von Franck und Hertz auch ergeben hätte. Der Abstand der Maxima (bzw. Minima) unterscheidet sich aber deutlich, von dem Abstand, der sich aus der Theorie der Ionisierung ergeben hätte. Wenn man von einer Ionisierung ausgegangen wäre, hätte der Abstand ca. 10,4 eV betragen müssen, der Abstand bei der Messkurve ist deutlich kleiner.

Franck und Hertz ist dies zunächst nicht aufgefallen, da sie die Ionisationsenergie von Quecksilber noch nicht kannten und somit die Differenz nicht entdecken konnten.

Franck und Hertz haben statt die Ionisierungsenergie das Anregungsniveau von Quecksilber bestimmt.

- **Franck-Hertz-Versuch mit Hg – Messwertaufnahme mit Cassy**

Antwortbox 1: Verlauf des Graphen



Bereich 1:

Bei sehr niedrigen Beschleunigungsspannungen ($U_2 < U_3$) werden die Elektronen nicht ausreichend beschleunigt, um das Gegenfeld überwinden zu können. Darum wird zu Beginn keine Stromstärke gemessen.

Bereich 2:

Mit wachsender Beschleunigungsspannung erreichen (zunächst) immer mehr Elektronen pro Zeit die Anode, d. h. die Stromstärke steigt an. Die Elektronen stoßen zwar mit den Hg-Atomen zusammen, allerdings treten bei niedrigen Beschleunigungsspannungen nur elastische Stöße auf und die Elektronen geben (praktisch) keine kinetische Energie ab.

Bereich 3:

Bei einem bestimmten Wert der Beschleunigungsspannung U_2 , nimmt die gemessene Stromstärke I_A plötzlich ab. Hier haben die Elektronen eine ausreichend große kinetische Energie erreicht, um mit den Hg-Atomen einen unelastischen Stoß auszuführen. D. h. die kinetische Energie der Elektronen entspricht (mindestens) der Anregungsenergie der Hg-Atome, also der Energiedifferenz zwischen dem Grundzustand und dem ersten angeregten Zustand. Da die Elektronen ihre Energie an die Hg-Atome übertragen haben, beträgt ihre kinetische Energie annähernd null und sie können das Gegenfeld nicht mehr überwinden.

Bereich 4:

Danach steigt die gemessene Stromstärke mit Erhöhung der Beschleunigungsspannung wieder an. Da die Beschleunigungsspannung nun höher ist, haben die Elektronen schon früher (d.h. weiter von dem Gitter entfernt) ausreichend Energie, um einen unelastischen Stoß mit den Hg-Atomen auszuführen. Die Potenzialdifferenz zwischen diesem Ort und dem Gitter reicht aus, um die Elektronen noch einmal so stark zu beschleunigen, dass sie die Gegenspannung überwinden können und es erreichen mit wachsender Beschleunigungsspannung mehr Elektronen pro Zeitintervall die Anode, wodurch die gemessene Stromstärke wieder steigt.

Bereich 5:

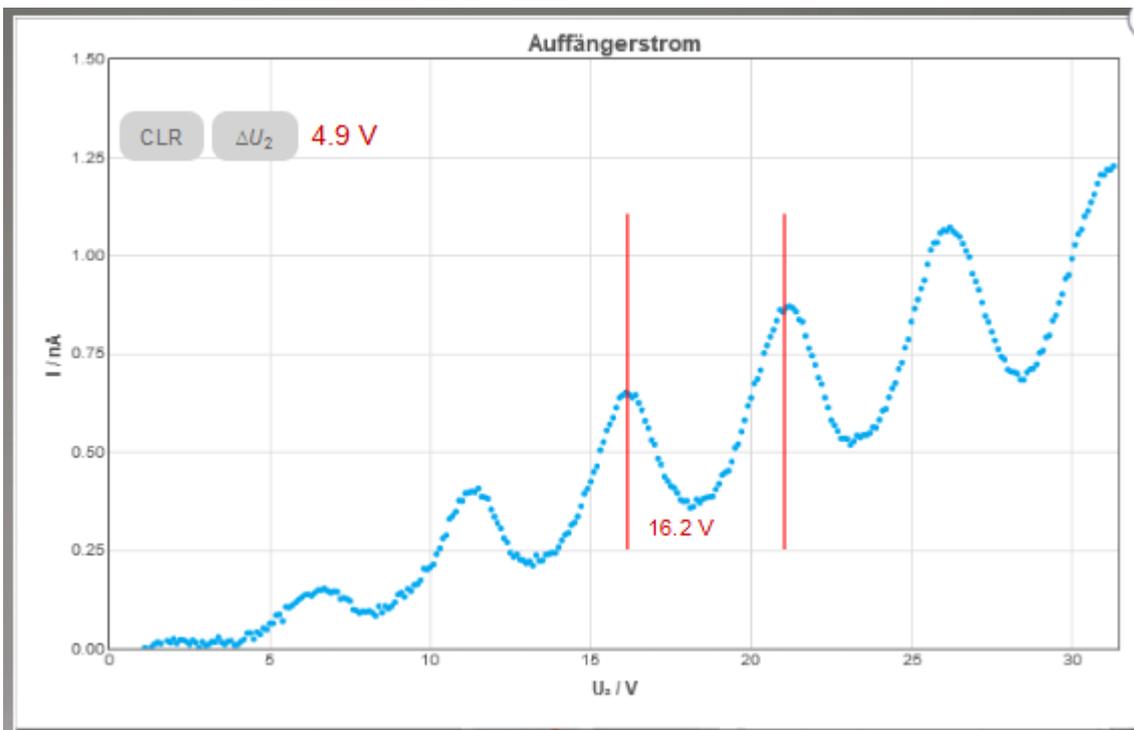
Bei weiterer Steigerung der Beschleunigungsspannung wächst die kinetische Energie Elektronen nach dem Stoß ein zweites Mal vor dem Gitter so weit, dass sie einen zweiten unelastischen Stoß durchführen können. Hierbei geben sie wieder annähernd ihre gesamte kinetische Energie ab und können die Gegenspannung nicht mehr überwinden.

Bereich 6:

Auf diese Weise können die Elektronen auf ihrem Weg zur Anode gleich zwei- oder mehrmals ihre Energie an Hg-Atome abgeben. So erklärt sich das Auftreten mehrerer Maxima bzw. Minima in der Spannungs-Stromstärke-Kurve.

Antwortbox 2: Anregungsenergie von Quecksilber und Bestimmung der Wellenlänge

Anregungsenergie:



Die Maxima haben jeweils einen Abstand von ca. 4,9 V, d.h. die Anregungsenergie von Quecksilber beträgt 4,9 eV.

Wellenlänge:

Es gilt: $E_{ph} = h \cdot f = h \cdot \frac{c}{\lambda}$, also $f = \frac{E_{ph}}{h}$ und $\lambda = h \cdot \frac{c}{E_{ph}}$.

Setzt man die bekannten Zahlenwerte ein, ergeben sich:

$f = 1,18 \cdot 10^{15}$ Hz und $\lambda = 253 \cdot 10^{-9}$ m = 253 nm

Bei dem ausgesandten Licht handelt es sich um UV-Licht.

Antwortbox 3: Kein sichtbares Licht

Für den Menschen sichtbares Licht hat eine Wellenlänge zwischen 400nm und 800nm.

Nach $E_{ph} = h \cdot f = h \cdot \frac{c}{\lambda}$ haben die ausgesendeten Photonen Energien zwischen

Ca. 1,5 eV und 3 eV. Die Ergebnisse des Franck-Hertz-Versuchs zeigen, dass die Differenz zwischen den Grundzustand und dem ersten Anregungsniveau bei Hg ca. 4,9 eV betragen. D.h. nach der Anregung auf das erste Energieniveau können nur Photonen mit der entsprechenden (zu großen Energie) abgegeben werden. Die Übergänge im sichtbaren Bereich müssen also zwischen höheren Energieniveaus stattfinden. Beim Franck-Hertz-Versuch werden die Hg-Atome aber nicht auf höhere Energieniveaus angeregt, da die Elektronen sobald sie eine kinetische Energie von 4,9 eV haben diese durch einen unelastischen Stoß abgeben und gar nicht ausreichend kinetische Energie bekommen, um die Hg-Atome auf höhere Niveaus anzuregen.

- **Franck-Hertz-Versuch nach Franck, Knipping und Einsporn**

Antwortbox 1:

4,68 V: An dieser Stelle nimmt die Anodenstromstärke ab, der Verlauf ist hier ähnlich wie bei der original Franck-Hertz-Kurve, auch wenn die Abnahme deutlich geringer ist. D. h. es kommen weniger Elektronen bei der Auffängerelektrode an, als zuvor. Genau wie bei der Deutung des originalen Franck-Hertz-Versuchs kann man annehmen, dass die Elektronen ihre kinetische Energie bei einem unelastischen Stoß abgegeben haben und durch die Gegenspannung nicht mehr überwinden können.

5,29 V und 5,78 V: An diesen beiden Stellen "knickt" die Kurve im Vergleich zum erwarteten Verlauf nach unten ab, d. h. es kommen auch hier weniger Elektronen als erwartet bei der Auffängerelektrode an, wodurch die Stromstärke geringer wird. Auch diese Elektronen haben ihre Energie bei einem unelastischen Stoß abgegeben.

6,73 V: An dieser Stelle steigt die Kurve weniger stark an, als es zu erwarten wäre. Dies ist daran zu erkennen, dass der Messwert nach 6,73 V weniger stark ansteigt, als dies beim Messwert vorher gewesen ist. D.h. hier nimmt der Anodenstrom nicht so stark zu wie erwartet, es müssen also auch hier einige Elektronen Energie durch einen Stoß abgegeben haben.

Antwortbox 2:

1: 4,9 eV

2: 4,68 eV

3: 6,73 eV

Antwortbox 4:

Bei der ursprünglichen Variante finden kaum Stöße statt, bei denen mehr als 4,9 eV abgegeben werden, da die Elektronen ihre Energie bei einem Stoß abgeben, sobald sie die 4,9 eV erreicht haben und somit gar nicht (bzw. nur äußerst selten) auf mehr als 4,9 eV beschleunigt werden. Bei der Knipping Variante werden die Elektronen auf einer so kurzen Strecke beschleunigt, dass Stöße unwahrscheinlich sind, bevor sie die maximale kinetische Energie erreicht haben. D.h. die Elektronen können auch kin. Energien von mehr als 4,9 eV erreichen und somit höhere Niveaus anregen.

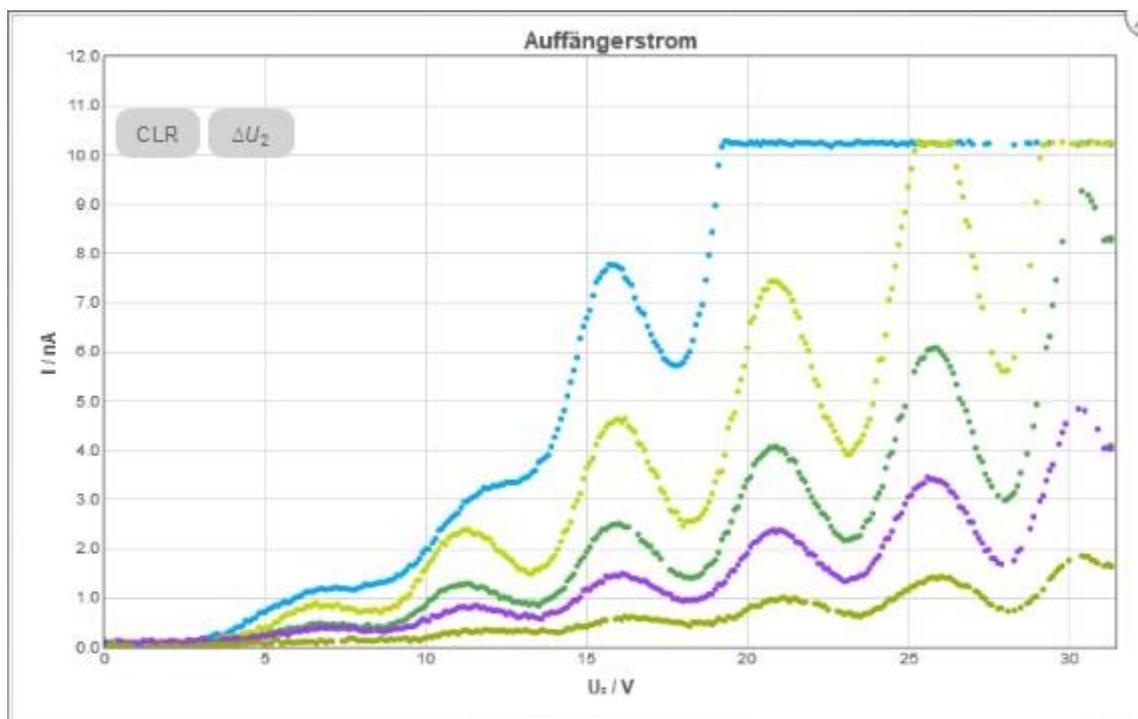
• Franck-Hertz-Versuch mit Quecksilber - Einfluss der Temperatur

Antwortbox 1: Heizen der Röhre

Da Quecksilber bei Raumtemperatur flüssig ist, würden – vor allem wegen seines bei dieser Temperatur besonders geringen Dampfdrucks – überhaupt keine (bzw. nur sehr wenige) Quecksilberatome als Stoßpartner zur Verfügung stehen. Beim Heizen der Röhre verdampft ein wenig Quecksilber aus dem Tropfen, so dass in der Röhre ein etwas dichteres Quecksilbergas entsteht und die Elektronen mit den

Quecksilberatomen dieses Gases wechselwirken können. Abhängig von der Temperatur wird sich die Anzahl der freien Quecksilberatome unterscheiden, wodurch sich auch die Zahl der möglichen Stoßpartner unterscheidet.

Antwortbox 2: Beschreibung und Begründung der Unterschiede



Beschreibung:

Es ist deutlich zu erkennen, dass bei gleicher Beschleunigungsspannung der Auffängerstrom mit höheren Temperaturen kleiner ist als bei geringeren Temperaturen.

Die Kurven bei geringen Temperaturen steigen schnell an, zeigen nur mäßig ausgeprägte Minima und der Auffängerstrom steigt schnell über den messbaren Bereich.

Die Kurven bei hohen Temperaturen verlaufen sehr flach und die Maxima und Minima sind auch verhältnismäßig gering ausgeprägt.

Begründung:

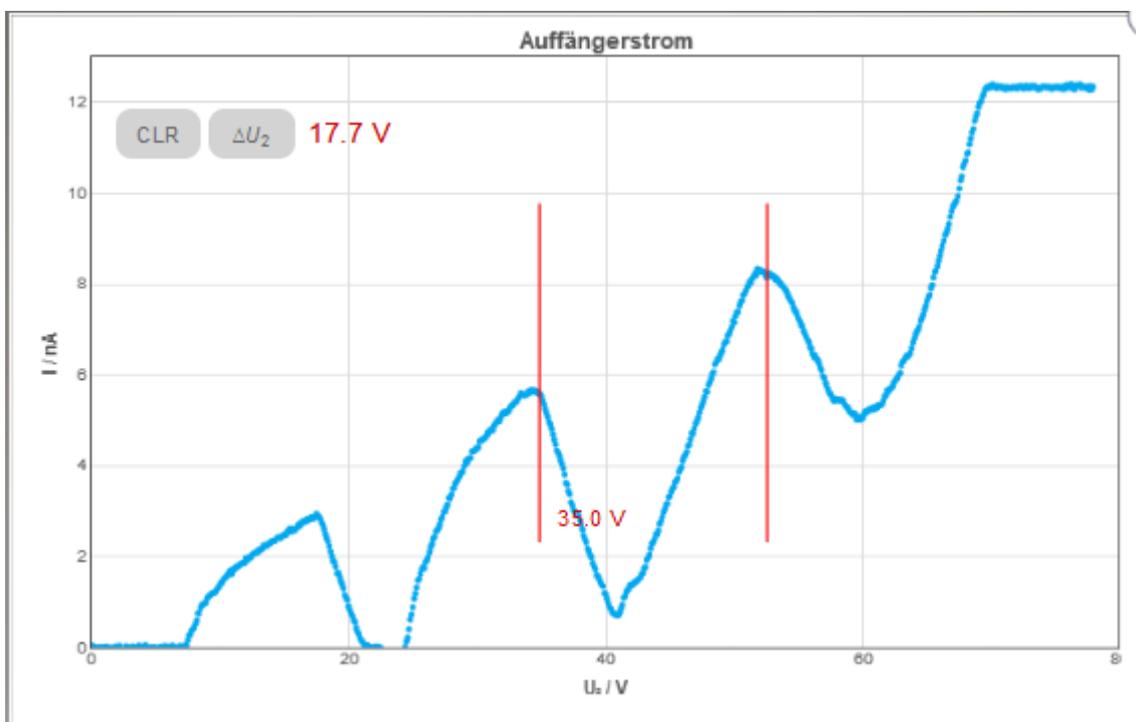
Bei geringen Temperaturen sind relativ wenig Quecksilberatome verdampft, wodurch die Anzahl der Stöße relativ gering ist und sehr viele Elektronen bei der Auffängerelektrode ankommen, ohne einen Stoß auszuführen.

Bei hohen Temperaturen befinden sich sehr viele freie Quecksilberatome in der Röhre und den Elektronen gelingt es kaum, die Röhre zu durchqueren, da sie immer wieder durch elastische Stöße zurückgeworfen werden.

• Franck-Hertz-Versuch mit Neon

Antwortbox 1: Gemeinsamkeiten und Unterschiede

Verlauf des Graphen:



Gemeinsamkeiten:

- Anstieg erst wenn $U_2 > U_3$, also wenn die Beschleunigungsspannung größer als die Gegenspannung ist
- Prinzipieller gleicher Verlauf, also Anstieg bis zu einem bestimmten Beschleunigungsspannung, dann Abfall und später erneuter Anstieg. Nach der gleichen Spannungserhöhung wie vorher, erfolgt ein erneuter Abfall.

Unterschiede:

- Der Abstand zwischen den Maxima unterscheidet sich bei Hg und Ne.

Anregungsenergie von Neon:

Die Differenz der Maxima beträgt ca. 17,7 V, d.h. bei dem Experiment wird eine Anregungsenergie von 17,7 eV nachgewiesen.

Antwortbox 2: Leuchterscheinungen

Beschreibung: Kurz nachdem bei ca. 18 V das erste Maximum bei der Messkurve erreicht wurde, entsteht am rechten Gitter eine Leuchterscheinung, die mit wachsender Beschleunigungsspannung nach links wandert. Kurz nachdem das zweite Maximum erreicht wurde, entsteht wieder am rechten Gitter eine zweite Leuchterscheinung. Beide Leuchterscheinungen wandern mit wachsender Beschleunigungsspannung weiter nach links. Bei dritten und vierten Maximum entsteht dann analog eine dritte bzw. vierte Leuchterscheinung.

Erklärung: Die Leuchterscheinungen entstehen, wenn die angeregten Neonatome wieder in ein niedrigeres Energieniveau übergehen. Die dabei freiwerdende Energie wird in Form eines Photons ausgesendet. D.h. die erste Leuchterscheinung entsteht genau dann, wenn die Elektronen hinreichend Energie haben, um die Neonatome anzuregen. Dies ist dann erstmals bei ca. 18V am Ende der Beschleunigungsstrecke der Fall. Mit steigender Beschleunigungsspannung erreichen die Elektronen die ausreichende kinetische Energie bereits früher, so die die Leuchterscheinung nach links wandert. Wenn die Elektronen mit ca. 36 V beschleunigt werden, haben sie am Ende der Beschleunigungsstrecke erneut hinreichend Energie, um einen zweiten Stoß auszuführen, so dass dann eine zweite Leuchterscheinung entsteht. Diese wandert analog zur obigen Beschreibung dann mit steigender Beschleunigungsspannung ebenfalls nach links. Bei $3 \cdot 18V$ entsteht entsprechend der obigen Beschreibung die dritte Leuchterscheinung.

Antwortbox 3a: Begründung des Abfalls nach dem Maximum

Die Franck-Hertz-Röhre ist nur mit einem geringen Gasdruck gefüllt. D.h., wenn die Elektronen erst kurz vor dem Gitter 2 ausreichend kinetische Energie haben, um ein Neonatom anregen zu können, ist die Wahrscheinlichkeit, dass sie aufgrund der geringen Anzahl an Atomen in der Röhre, auf ein Neonatom treffen sehr gering. D.h. sehr viele Elektronen finden keinen Stoßpartner und gelangen zur Auffängerelektrode, obwohl sie ausreichend Energie für eine Anregung hätten. Die Wahrscheinlichkeit, dass sie keine Stoßpartner finden, nimmt mit wachsender Beschleunigungsspannung kontinuierlich zu, da die Strecke, die sie mit ausreichender Energie für einen unelastischen Stoß zurücklegen immer länger wird und dadurch die Wahrscheinlichkeit wächst, dass sie auf ein Neonatom treffen.

Antwortbox 3b: Begründung der Lage der Minima

Wie bei der vorherigen Antwort beschrieben, kann es passieren, dass einige Elektronen nicht auf ein Neonatom treffen und keinen Stoß ausführen können. Dadurch behalten sie ihre Energie und gelangen zur Auffängerelektrode. Die (wenigen) Elektronen erzeugen dann weiterhin einen kleinen Anodenstrom.

Die Wahrscheinlichkeit, dass sie nicht hinreichend Stoßpartner finden, ist bei mehreren möglichen Stößen, also bei höheren Beschleunigungsspannungen größer als bei nur einem möglichen Stoß (die Anzahl wächst und die zur Verfügung stehende Strecke in

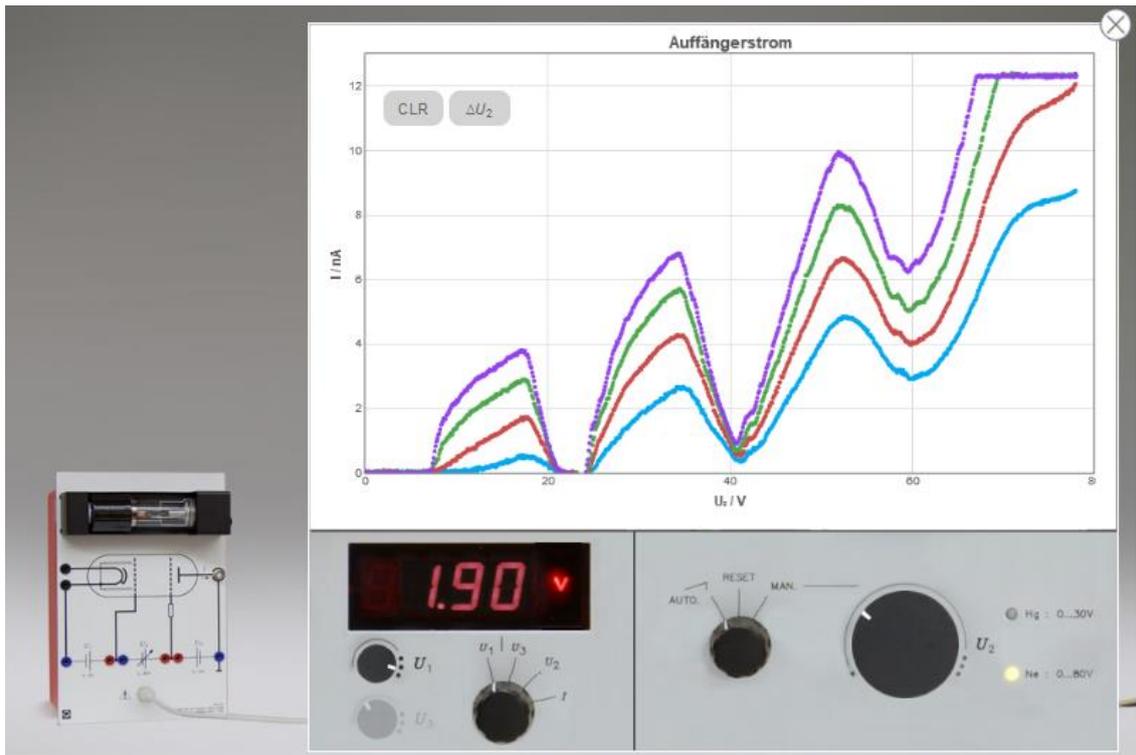
Relation zur Anzahl der Stöße sinkt). Deshalb nimmt die Anzahl der Elektronen, die ihre Energie nicht abgeben, bei mehreren möglichen Stößen zu, so dass der Anodenstrom immer weniger stark zurückgeht.

- **Franck-Hertz-Versuch mit Neon – Einfluss der Absaugspannung**

Antwortbox 1: Gemeinsamkeiten und Unterschiede

Beide Röhren sind nahezu identisch aufgebaut. Der einzige Unterschied ist, dass bei der vereinfachten Röhre das Gitter 1 fehlt und somit auch die Absaugspannung.

Antwortbox 2: Einfluss der Absaugspannung



Man kann erkennen, dass mit wachsender Absaugspannung die Maxima immer stärker ausgeprägt werden.

Der Vorteil ist natürlich, dass bei stärker ausgeprägten Maxima die Differenz der Maxima leichter bestimmen kann (eine zu hohe Absaugspannung erhöht die Anodenspannung dann aber auch so stark, dass die Maxima im gegebenen Messbereich nicht mehr dargestellt werden können.)

- **Franck-Hertz-Versuch mit Neon – Einfluss der Gegenspannung**

Antwortbox 1: Gemeinsamkeiten und Unterschiede



Gemeinsamkeiten:

- Alle Kurven zeigen prinzipiell einen ähnlichen Verlauf, bei dem abwechselnd Maxima und Minima im gleichen Abstand entstehen.
- Die Maxima befinden sich bei allen Kurven an der gleichen Stelle.

Unterschiede:

- Von Null verschiedene Messwerte treten bei den Kurven zu höheren Gegenspannungen erst später ein.
- Bei gleichen Beschleunigungsspannungen sind die Anodenstromstärken umso größer, je kleiner die Gegenspannung ist.
- Die Minima sind bei größeren Gegenspannungen etwas nach rechts verschoben

Antwortbox 2: Prüfung des Versatzes

Die Kurven steigen erstmalig an, wenn die Beschleunigungsspannung größer als die Gegenspannung ist, $U_2 > U_3$.

Die ist einleuchtend, da wenn $U_2 < U_3$ ist, reicht die kinetische Energie der Elektronen nicht aus, um das Gegenfeld zu überwinden

Antwortbox 3: Lage der Maxima

Die Lage der Maxima bleibt gleich, da diese genau die Stellen markieren, wo die Elektronen erstmals hinreichend beschleunigt wurden, um einen unelastischen Stoß durchzuführen und diese Stelle / dieser Wert unabhängig von der Gegenspannung ist.

Antwortbox 4a: Verschiebung der Minima

Die Lage der Minima verschiebt sich nach rechts, da die Elektronen nach dem Stoß ja erstmal wieder hinreichend Energie haben müssen, um die Gegenspannung zu

überwinden und je größer die Gegenspannung, desto stärker müssen sie nach dem Stoß wieder beschleunigt werden.

Antwortbox 4b: Gegenspannung 20V

Bei einer Gegenspannung von 20V wäre der Anodenstrom (annähernd) konstant Null. Alle Elektronen, die hinreichend Energie hätten, um die Gegenspannung zu überwinden, hätten auch genug Energie für einen unelastischen Stoß. D.h. (fast) alle Elektronen würden ihre Energie bei dem Stoß abgeben und somit die Auffängerelektrode nicht erreichen.

• **Historisches zum Franck-Hertz-Versuch (1)**

Antwortbox 1: Zwei Interpretationen

Die erste Interpretation:

Hg-Atome können nur Energiepakete in Vielfachen von 4,9 eV absorbieren.

Die zweite Interpretation:

Die Elektronen stoßen so häufig mit Hg-Atomen, dass sie praktisch nie höhere Energie erhalten können.

Antwortbox 2: Ausschluss der ersten Interpretation

Der Ausschluss der ersten Interpretation erfolgt über das Zusatzexperiment von Franck und Hertz, mit dem lediglich eine 4,9 eV-Linie des angeregten Hg-Atoms nachgewiesen werden konnte.

Antwortbox 3: Quarzglas

Es soll UV-Licht nachgewiesen werden, daher muss man Quarzglas verwenden, da dieses (in Grenzen) für UV-Licht durchlässig ist.

Antwortbox 4: Gründe

Bohrs Theorie wurde zu der Zeit, als Franck und Hertz ihre Veröffentlichung machten, selbst auf einer größeren Tagung nicht diskutiert – und Franck und Hertz waren nachlässig im Lesen von Veröffentlichungen, sodass sie Bohrs Ideen nicht bereits zur Kenntnis genommen hatten.

Antwortbox 5: Rechnung

$$1\overset{\circ}{\text{Å}} = 1 \cdot 10^{-10} \text{ m} = 0,1 \cdot 10^{-9} \text{ m} = 0,1 \text{ nm}$$

$$E = h \cdot f = \frac{h \cdot c}{\lambda}$$

$$\text{wobei } h \cdot c = 4,14 \cdot 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s} \cdot 3,00 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

- **Historisches zum Franck-Hertz-Versuch (2)**

Antwortbox 1: Vorstellung der Anregung

Franck und Hertz gingen davon aus, dass es sich bei der Energie von $hf = 4,9 \text{ eV}$ um die Ionisierungsenergie des Quecksilbers handelt. In früheren Experimenten hatten sie jedoch auch beobachtet, dass die meisten Quecksilberatome bei Stößen mit Elektronen dieser Energie zwar Energie aufnehmen, jedoch nicht ionisiert werden. Sie schließen daraus, dass ein Elektron im Atom mit einer entsprechenden Frequenz f schwingen müsse und durch Stöße zu Resonanzschwingungen angeregt wird. Durch diese Schwingung wiederum wird Energie in Form von Licht der Frequenz f abgestrahlt.

Textstelle:

... Wie wir in unserer früheren Arbeit [1] betont haben, führt die Mehrzahl der Stöße, die auf das schwingende Elektron eine Energie $h\nu$ übertragen, nicht zur Ionisierung. In den Atomen, die solche Stöße erlitten haben, gibt es also ein Elektron der Energie $h\nu$, das mit der Frequenz ν schwingt. Man könnte daher erwarten, daß solche Stöße, die nicht zur Ionisation, aber zu einem Energieverlust $h\nu$ führen, von einer Lichtemission der Frequenz ν begleitet sein sollten, d. h., daß es möglich sein sollte, die Emission von Resonanzstrahlung zu beobachten ...

Antwortbox 2: Richtig oder falsch

Aussage 1: richtig

Aussage 2: falsch. Nach heutiger Vorstellung führen die Stöße der Energie $4,9 \text{ eV}$ weder zur Ionisation noch zur Schwingung eines Hüllenelektrons, sondern zum Übergang zwischen verschiedenen Energieniveaus des Quecksilberatoms.

Aussage 3: richtig. Franck und Hertz machen dazu allerdings nur indirekte Angaben (z. B. ausschließlich eine Linie bei 2536 \AA).

Aussage 4. richtig

Aussage 5. richtig (wenn das Atom tatsächlich angeregt wurde)

Antwortbox 3: Ein Elektron oder viele?

Es handelt sich um die Energie der vielen in der Röhre befindlichen beschleunigten Elektronen.

Begründung: Auch Franck und Hertz gehen von der Quantenhypothese aus. Ein einzelnes Elektron kann deshalb nur zur Ionisierung oder zur Emission eines Lichtquants führen. Beides ist durch ein einzelnes Elektron nicht möglich.

Antwortbox 4: Sichtbares Licht bei 10 eV-Elektronen?

Franck und Hertz betonen sehr klar, dass auch bei einer Veränderung der Spannung bis 8 V außer der gemessenen Linie keine andere der bekannten Quecksilberlinien sichtbar wird. Wenn nun bei Spannungen von 10 V sichtbares Licht erscheint, so wird die Erklärung mit ihren Vorstellungen sehr kompliziert, da zur Anregung von Schwingungen des sichtbaren Lichts Energien weit unter $4,9 \text{ eV}$ ausreichen. Es ist also einerseits

schwer erklärbar, warum dieses Licht bei ihren Messungen nicht zu sehen war. Andererseits sollten Quecksilberatome durch Stöße oberhalb 4.9 eV auch ionisiert sein, sodass sich Hüllenelektronen nicht zu Schwingungen anregen lassen.

Mit dem Bohr'schen Atommodell sind Lichtfrequenzen im Sichtbaren durch Übergänge zwischen höheren Energieniveaus des Quecksilberatoms leicht erklärbar.

Antwortbox 5: Bohrs Problem

Wenn Franck und Hertz bei 4,9 eV bereits die Ionisationsenergie von Hg gemessen hätten, wären nach der Bohr'schen Vorstellung keine weiteren, frequenzgrößereren (also energiereicheren) Emissionslinien des Hg mehr möglich gewesen.

Antwortbox 6: erg vs. J

erg in Joule: $1 \text{ erg} = 10^{-7} \text{ Joule}$ (CGS-Einheitensystem).

Antwortbox 7: Lise Meitner

Lise Meitner hat zusammen mit Otto Hahn die Spaltbarkeit des Uran-Atomkerns entdeckt bzw. erklärt (im Wesentlichen 1938 bis 1939).

• **Hg - Leuchterscheinung**

Antwortbox 1: 4,9-eV-Photonen

Es ist zu zeigen, dass ein 4,9-eV-Photon keine Wellenlänge im für das menschliche Auge sichtbaren Bereich (ca. 400 bis 800 nm) hat.

$$\text{Es ist } E_{ph} = h \cdot f = h \cdot \frac{c}{\lambda}, \text{ also } f = \frac{E_{ph}}{h} \text{ und } \lambda = h \cdot \frac{c}{E_{ph}}.$$

Setzt man die bekannten Zahlenwerte ein, ergeben sich:

$$f = 1,18 \cdot 10^{15} \text{ Hz} \text{ und } \lambda = 253 \cdot 10^{-9} \text{ m} = 253 \text{ nm} \text{ (UV-Licht).}$$

Antwortbox 2: Erklärung der Leuchterscheinung

Der erste angeregte Quecksilberzustand erzeugt für das menschliche Auge unsichtbares UV-Licht. Zur Aufnahme des Fotos wurden die Röhre und die Kathode viel stärker als normal geheizt. Dadurch entstehen weit mehr Kollisionen zwischen Elektronen und Hg-Atomhülle als normal, sogar so viele, dass einige Quecksilberatome in deutlich höhere Anregungsniveaus versetzt wurden. Wenn die Atome dann von diesen deutlich höheren Anregungsniveaus zunächst auf ein etwas niedrigeres Niveau zurückgehen, erzeugen sie das blaue Licht, das im Bild zu sehen ist.

- **Ne - Leuchterscheinung**

Antwortbox 1: 19 eV-Photonen

Es ist $E_{ph} = h \cdot f = h \cdot \frac{c}{\lambda}$, also $f = \frac{E_{ph}}{h}$ und $\lambda = h \cdot \frac{c}{E_{ph}}$.

Setzt man die bekannten Zahlenwerte ein, ergeben sich:

$f = 4,59 \cdot 10^{15}$ Hz und $\lambda = 65,3 \cdot 10^{-9}$ m = 65,3 nm (an der Grenze zwischen UV-Licht und Röntgenstrahlung).

Antwortbox 2: Strahlung

Es ist (s. o.) $\lambda = 65,3 \cdot 10^{-9}$ m = 65,3 nm. Es handelt sich um Photonen, die der Grenze zwischen UV-Licht und Röntgenstrahlung einzuordnen sind.

Antwortbox 3: 3p nach 3s

Die kleinste angegebene Wellenlänge bei einem Übergang von 3p nach 3s beträgt $\lambda = 585,2$ nm.

Die größte angegebene Wellenlänge bei einem Übergang von 3p nach 3s beträgt $\lambda = 703,2$ nm.

Es handelt sich daher in allen Fällen um Licht im orangefarbenen bis roten Bereich des sichtbaren Spektrums. Vgl. z. B. <https://www.bfs.de/DE/themen/opt/sichtbares-licht/einfuehrung/einfuehrung.html>.

Antwortbox 4: Fachliche Fehler und Ergänzungen

Fachliche Fehler:

- Ne hat 10 und nicht 14 Elektronen.
- 9 Elektronen sind nicht mit $n=2$ möglich (angeregter Zustand).
- Beim Rücksprung von $n=2$ auf $n=1$ ($E_{ph} \approx 16$ eV, $\lambda \approx 77$ nm) wäre weiche Röntgenstrahlung zu erwarten.
- Hg wird nicht vollständig verdampft - Dampfdruck-Kurve für Hg analysieren lassen.
- Formulierung „leider liegt ... im UV-Bereich“ wird bei Hg genannt, bei Ne wäre es noch deutlich weiter im UV-Bereich.

Ergänzungen:

- Ein Hinweis auf das Zustandekommen der roten Ne-Leuchterscheinung hätte genannt werden sollen, da ansonsten missverständlich bzw. irreführend sein könnte, dass 19 eV-Elektronen unmittelbar zur roten Ne-Leuchterscheinung führen könnten.

- **Na - Leuchterscheinung**

Antwortbox 1: Wellenlänge und Frequenz

Man liest aus der Grafik für die Wellenlänge ab: $\lambda \approx 588\text{nm}$.

Mit $\lambda \cdot f = c$ ergibt sich:

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{3,00 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{588 \cdot 10^{-9} \text{m}} = 5,1 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$$

Antwortbox 2: Verlauf der Kurve

Begründung des Abfalls: Nicht alle Elektronen regen die Na-Atome unmittelbar nach dem Erreichen von 2,1 eV an. Auch wenn die Beschleunigungsspannung größer als 2,1 eV ist, können 2,1 eV-Anregungen stattfinden.

Begründung des nicht verschwindenden Minimums: Nicht alle Elektronen geben ihre Energie an Na-Atome ab, sodass diese Elektronen immer die Gegenspannung überwinden können (wenn überhaupt erst die Beschleunigungsspannung entsprechend groß ist, hier ca. 1,0 V) und somit zu einem nicht verschwindenden Stromfluss beitragen.

Antwortbox 3: Übereinstimmung

Es ist zu prüfen, ob eine aus der Kurve entnehmbare 2,1 eV-Anregung zu einer Leuchterscheinung im gelben Bereich führen kann, also in die Größenordnung der Wellenlänge der gelben Na-Linie führt.

Es ist $E_{ph} = h \cdot f = h \cdot \frac{c}{\lambda}$, also $f = \frac{E_{ph}}{h}$ und $\lambda = h \cdot \frac{c}{E_{ph}}$.

Setzt man die bekannten Zahlenwerte ein, ergibt sich: $\lambda = 591 \cdot 10^{-9} \text{ m} = 591 \text{ nm}$, was recht gut zu der weiter oben abgelesenen Wellenlänge von $\lambda \approx 588 \text{ nm}$ passt.

Antwortbox 4: Ionisationsenergie

Da die Beschleunigungsspannung die Gegenspannung nicht übersteigt, können die Elektronen das Gegenfeld nie überwinden.

Ab 5,14 V können Natriumatome ionisiert werden. Diese positiven Ionen werden dann von der (negativen) Gegenspannungselektrode angezogen, sodass es dadurch zu einem plötzlich einsetzenden, messbaren Strom kommt.

• He – Energiestufen im Termschema

Antwortbox 1: Idee

Erläuterung: Die entscheidende Idee ist, dass die beschleunigten Elektronen nur dann mit Hilfe der Kollektorelektrode R registriert werden, wenn sie durch eine Energieabgabe so langsam geworden sind, dass sie zur Kollektorelektrode hin abgelenkt werden können, während diese Ablenkspannung nicht ausreichend ist, beschleunigte Elektronen ohne zwischenzeitlichen Energieverlust anzuziehen (der

divergente Elektronenstrahl trifft nicht die Kollektorelektrode R). Somit lassen sich immer dann, wenn eine Energieabgabe der Elektronen stattgefunden hat, diese Elektronen nachweisen.

- **Exkurs: Dampfdruck und freie Weglänge in der Hg-Franck-Hertz-Röhre**

Antwortbox 1: Zuordnung der Kurven

Die rote Kurve stellt den Dampfdruck dar.

Begründung: Mit zunehmender Temperatur nimmt auch der Druck zu; dies zeigt die rote Kurve.

Die blaue Kurve gibt die freie Weglänge an.

Begründung: Mit zunehmender Temperatur nimmt auch die freie Weglänge ab; dies zeigt die blaue Kurve.

Antwortbox 2: Dampfdruck / Freie Weglänge

Dampfdruck: ca. 17 mbar

Freie Weglänge: $4 \cdot 10^{-4}$ m

Antwortbox 3: Ermittlung Dampfdruck

Abzulesen: $1200 \text{ Pa} = 1200 \cdot 10^{-5} \text{ bar} = 1200 \cdot 10^{-2} \text{ mbar} = 12 \text{ mbar}$.

In etwa größenordnungsmäßig passend zum Wert weiter oben.

- **Ein Kurzvortrag zum FHV – kritisch zugehört**

Antwortbox 1: Konstante Energie

Vermutlich gemeint: Die Elektronen werden so abgebremst, dass sie die zweite Elektrode nicht mehr erreichen.

Antwortbox 2: Verwechslung

Es geht um die Beschleunigungsstrecke, in der die Elektronen bis zu 4,9 eV Energie aufnehmen.

Antwortbox 3: Richtigstellung des Fehlers

Bei der doppelten Spannung tritt zum zweiten Mal eine Anregung auf und nicht, wie angegeben, ein Wiederansteigen des Stroms.

Antwortbox 4: Vielfache oder keine Vielfachen

Wenn genau nur eine UV-Linie im Spektrometer nachgewiesen werden kann, haben die beschleunigten Elektronen auch sofort nach dem Erreichen von 4,9 eV Energie an die Hg-Atome abgegeben. Das schließt jedoch nicht aus, dass sie auch höhere Energien als 4,9 eV bei entsprechender Beschleunigungsspannung erreichen könnten.

Antwortbox 5: 5335 Å-Linie

Mit $E_{ph} = h \cdot f = h \cdot \frac{c}{\lambda}$, also $f = \frac{E_{ph}}{h}$ und $\lambda = h \cdot \frac{c}{E_{ph}}$ folgt nicht die vom Sprecher angegebene Wellenlänge 5335 Å (=533,5 nm) sondern die Wellenlänge 2537 Å (=253,7 nm).

• Vermischte Aufgaben zum FHV

Aufgabe 1:

Da ein Elektron mit vergleichsweise geringer Masse auf ein Atom (aus Kern und Hülle) mit vergleichsweise großer Masse stößt, gibt es praktisch keine kinetische Energie ab. Vergleichbar ist dies (in Grenzen) u. a. mit dem Stoß eines Balls gegen eine Wand.

Aufgabe 2:

4,9 eV ist die erste Anregungsenergie für ein (neutrales) Hg-Atom. Wenn die beschleunigten Elektronen diese Energie besitzen und auf ein Hg-Atom treffen, geben sie diese Energie an ein Elektron aus der Hg-Atomhülle. Bei hinreichend vielen freien Quecksilberatomen ist die freie Weglänge zu kurz, als dass Elektronen genug Energie zur Anregung höherer Energieniveaus aufnehmen könnten.

Aufgabe 3:

Das unterste Anregungsniveau im Hg-Atom erfordert 4,9 eV. Erst bei noch höherer Energiezufuhr können höhere Niveaus angeregt werden, von wo aus dann aber über nur weniger tief liegende Niveaus Energie in Form von dann sichtbarem Licht abgegeben werden.

Aufgabe 4:

Die Heizspannung beträgt zumeist einige wenige Volt (z. B. 6 V). Wenn die Kathode mit diesem Potential direkt verbunden wäre, würden unterschiedliche Bereiche der dann direkt geheizten Kathode gegenüber der Beschleunigungselektrode eine unterschiedliche Potentialdifferenz aufweisen, was wegen der ebenfalls im ein- bis zweistelligen Bereich liegenden Beschleunigungsspannungen zu deutlichen systematischen Fehlern in der Messwertaufnahme führen würde.

Aufgabe 5:

Franck und Hertz gingen davon aus, dass sie die Ionisationsenergie von Quecksilber bestimmt hätten. Nach der ihnen damals noch unbekanntem Bohr'schen Theorie, handelt es sich jedoch „nur“ um das Anheben eines Hg-Elektrons auf ein höheres Energieniveau, nicht aber zur Ionisation des Hg-Atoms.

Aufgabe 6:

Die ausgesandten Photonen haben eine Energie von 4,9 eV. Die Austrittsarbeit von Cs beträgt ca. 1,7 bis 2,2 eV und diejenige von Platin 5,3 bis 5,7 eV. Die 4,9 eV-Photonen können daher lediglich in der Cs-Elektrode der Photozelle den Photoeffekt auslösen.