
Grundlagen der Physik

Einführung in die Quantenphysik



Lichtelektrischer Effekt (Photoeffekt)

Äußerer Photoeffekt

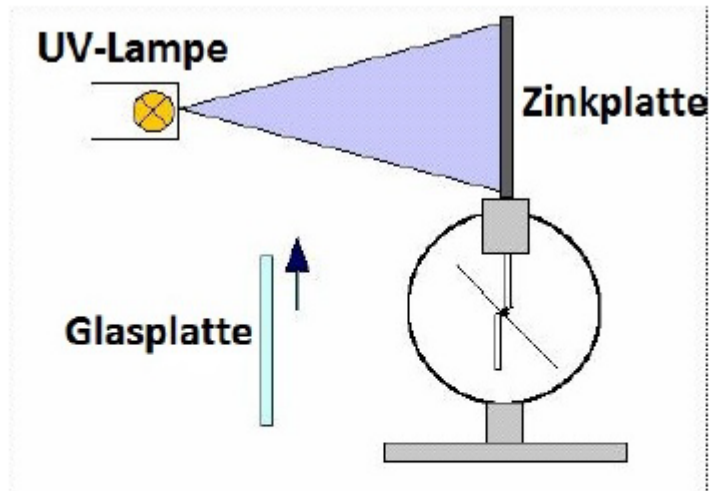


Abbildung 5: *Versuch 1*

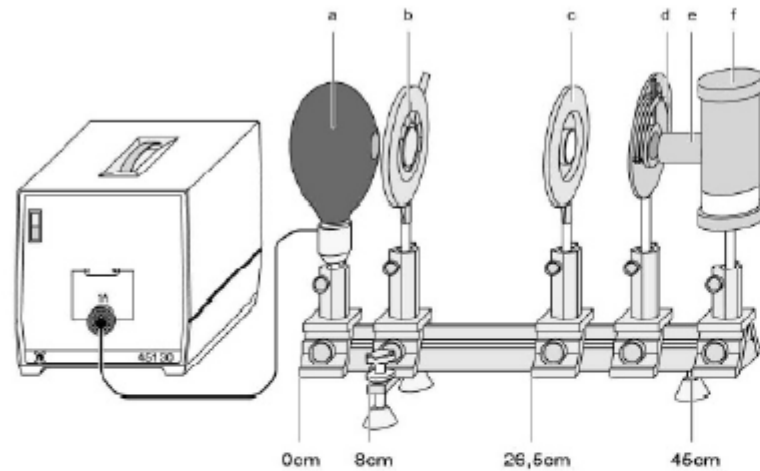
Eine Zinkplatte wird negativ aufgeladen, das Elektroskop schlägt aus. Nun wird sie mit UV-Licht bestrahlt, das Elektroskop kehrt in Ausgangsstellung zurück. Wiederholt man den Vorgang und hält vor der Bestrahlung eine Glasplatte zwischen Lampe und Platte, schlägt das EK immer noch aus. UV-Licht hat also Elektronen aus dem Metall ausgelöst. Glas adsorbiert UV-Licht, weswegen nichts geschah. Der Vorgang geschieht sofort. Zudem bestimmt nicht die Intensität, sondern die **Frequenz** an, ob Elektronen

ausgelöst werden (=Widerspruch zur klassischen Mechanik)!

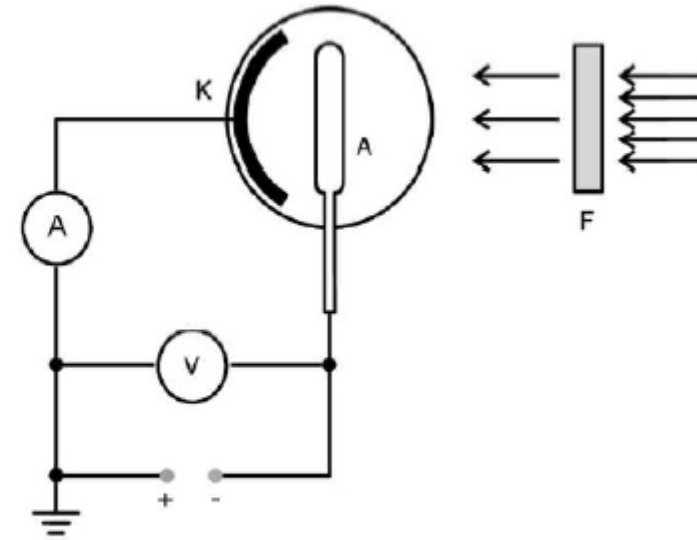


Lichtelektrischer Effekt (Photoeffekt)

Äußerer Photoeffekt



Optischer Aufbau, mit a. Quecksilber-Dampflampe, b. Polarisationsfilter, c. Linse, d-f. Fotozelle



Schaltplan Messapparatur



Lichtelektrischer Effekt (Photoeffekt)

Äußerer Photoeffekt

Beobachtungen:

1. Licht kann Elektronen aus einer Metallplatte herauslösen
2. Nur hochfrequentes (kurzwelliges) UV-Licht ist in der Lage Elektronen aus einer Zinkplatte herauszulösen. Dagegen geschieht dies nicht bei sichtbarem Licht einer Glühlampe, auch nicht bei beliebig großer Intensität.



Lichtelektrischer Effekt (Photoeffekt)

Äußerer Photoeffekt

Diese Beobachtungen lassen sich nur mit "Energieportionen", den so genannten Photonen erklären. Um mehr über den Zusammenhang der Frequenz und der Energie eines Photons zu erfahren, kann man die Gegenfeldmethode anwenden. Hier wird Licht auf eine Metallplatte gerichtet. Diese Metallplatte ist gleichzeitig die Kathode eines elektrischen Feldes. Erhöht man die Spannung U wird das elektrische Feld stärker. Die Elektronen erhalten $E_{kin} = Q \cdot U = e \cdot U$ in die ihrer Bewegungsrichtung entgegengesetzte Richtung. Erhöht man nun die Spannung langsam bis keine Elektronen mehr die Anode erreichen und damit der Photonenstrom I gleich 0 ist, kennt man die kinetische Energie, die die Elektronen von den Photonen erhalten haben. Führt man diesen Versuch für verschiedene Frequenzen und verschiedene Kathodenmaterialien durch erhält man folgenden Graphen:



Lichtelektrischer Effekt (Photoeffekt)

Äußerer Photoeffekt

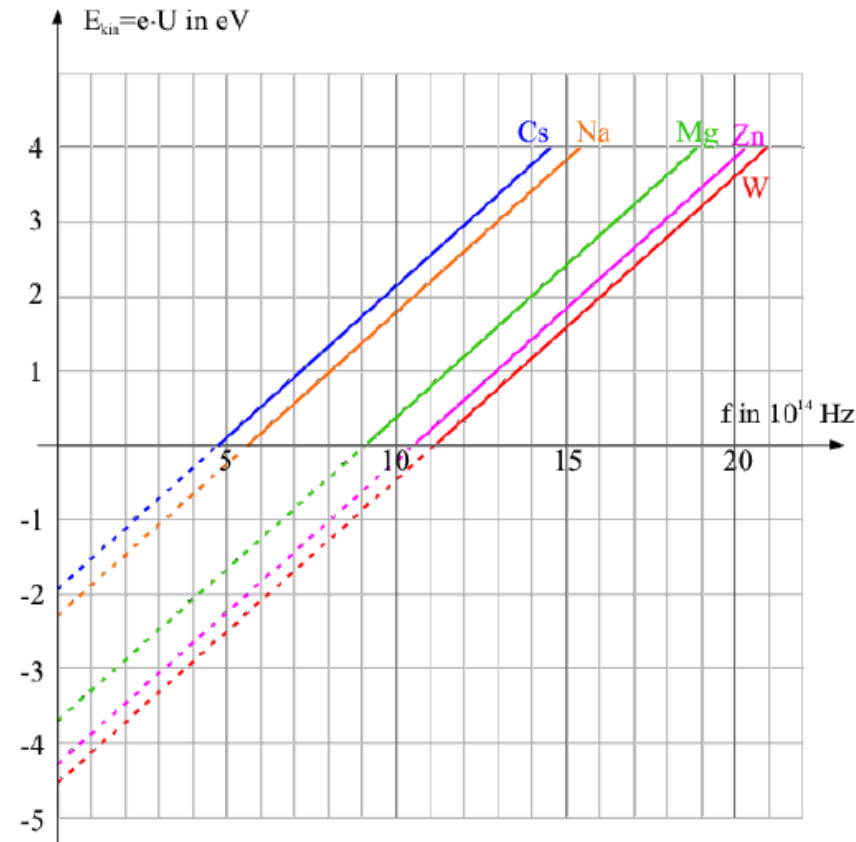


Abbildung 17: Graphische Auswertung der Gegenfeldmethode



Lichtelektrischer Effekt (Photoeffekt)

Äußerer Photoeffekt

Offensichtlich ist $\frac{\Delta E_{kin}}{\Delta f}$ konstant. Dieser Zusammenhang wird als *Planck'sche Wirkungsquantum* beschrieben. Außerdem ist es materialabhängig, wie viel Energie benötigt wird, um Elektronen aus den Metallplatten zu lösen. Diese Energie wird als die Austrittsenergie E_A bezeichnet. Wir haben also folgenden Zusammenhang:

$$h \cdot f = E_{kin} + E_A \quad (78)$$

Durch den Energieerhaltungssatz und des Wissens, dass nirgends Energie verloren ging oder abgesehen von dem Licht dem System keine Energie zugeführt wurde muss $E_{kin} + E_A = E_{Ph}$ gelten. Damit haben wir einen Zusammenhang zwischen der Frequenz und der Energie eines Photons:

$$h \cdot f = E_{Ph} \quad (79)$$



Lichtelektrischer Effekt (Photoeffekt)

Äußerer Photoeffekt

Mithilfe des Graphen aus Abbildung 17 lässt sich das Planck'sche Wirkungsquantum als

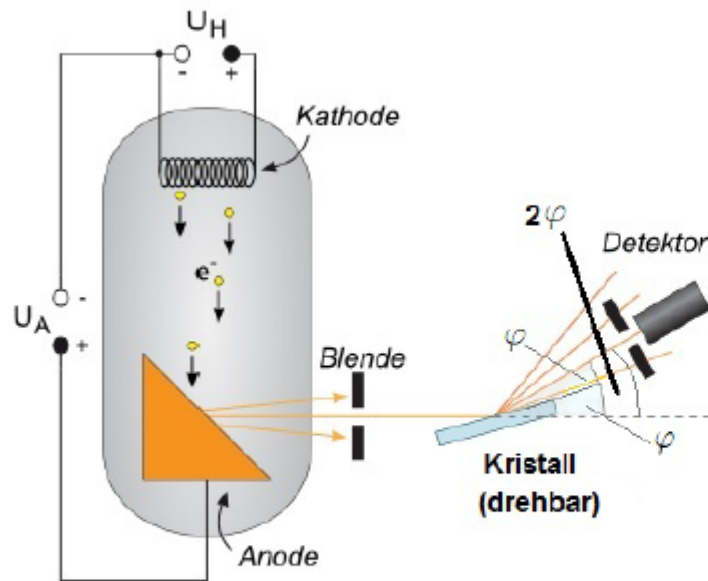
$$h = 6.6397 \cdot 10^{-24} \text{J s} \quad (80)$$

bestimmen.



Lichtelektrischer Effekt (Photoeffekt)

Röntgenspektren



sche Felder abgelenkt! Die Entstehung von Röntgenstrahlung wird auch als Umkehrung des Photoeffekts bezeichnet, da hier aus Energie von Elektronen Photonen erzeugt werden). Die Wellenlänge von Röntgenstrahlung ist sehr klein (weniger als ein Nanometer).

Treffen unter hoher Spannung beschleunigte Elektronen auf ein Hindernis, werden sie stark abgebremst. Werden Elektronen beschleunigt oder abgebremst, so strahlen sie Energie in Form von elektromagnetischen Wellen aus (Bremsstrahlung). Diese Strahlung wird in Form von Röntgenphotonen weiter in den Raum geschleudert. Röntgenstrahlung, auch X-Rays genannt, ist entstanden. Sie ist dem Licht sehr ähnlich und wird nicht durch elektrische oder magnetische



Lichtelektrischer Effekt (Photoeffekt)

Röntgenspektren

Es zeigt sich, dass Röntgenstrahlen an winzigen Gittern interferieren können. Die Gitter stellen Kristalle dar, die aus mehreren Netzebenen d_1 , bzw. d_2 bestehen. Mit der Bragg'schen Reflexionsbedingung (siehe Abschn. 5.4) ergibt sich für **konstruktive** Interferenz:

$$\delta = 2d \cdot \sin \varphi \quad (\text{mit: } \delta = k \cdot \lambda)$$



Lichtelektrischer Effekt (Photoeffekt)

Röntgenspektren

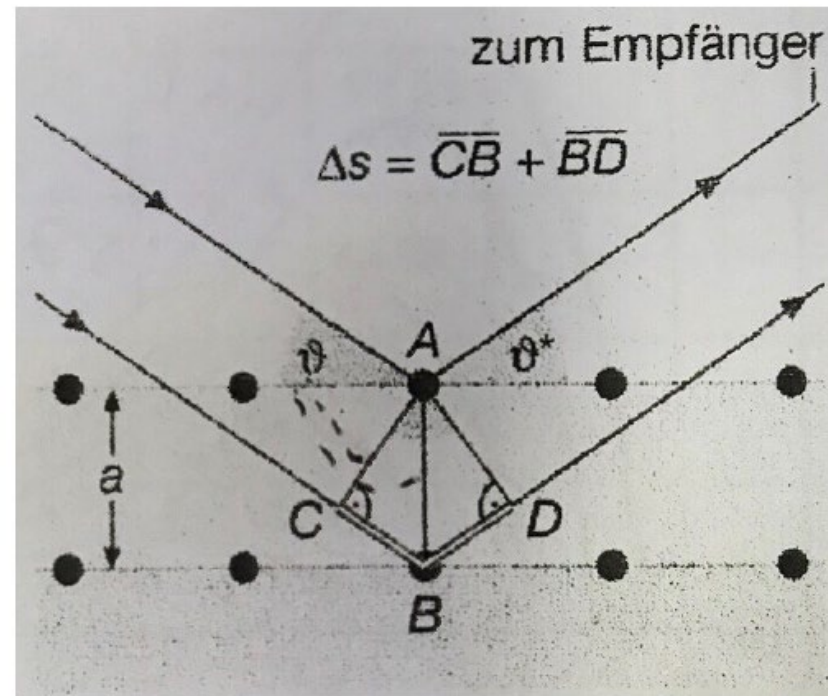


Abbildung 18: Bragg-Bedingung



Lichtelektrischer Effekt (Photoeffekt)

Röntgenspektren

Bragg-Bedingung Die Bragg-Bedingung beschreibt, welche Wellenlängen bei der Reflektion am Kristall wie in Abbildung 18 zu sehen ist verstärkt werden. Damit sich die Wellen konstruktiv überlagern, muss wie beim Doppelspalt $\Delta s = k \cdot \lambda, k \in \mathbb{N}$ erfüllt sein. Dabei ist $\Delta s = |CB| + |\overline{BD}|$. Da $|\overline{CB}| = |\overline{BD}|$ gilt, kann folgender Zusammenhang aufgestellt werden:

$$\begin{aligned}\frac{\Delta s}{2} &= |\overline{CB}| \\ \frac{\Delta s}{2} &= a \cdot \sin(\vartheta) \\ k \cdot \lambda &= 2a \cdot \sin(\vartheta), k \in \mathbb{N}\end{aligned}\tag{81}$$



Lichtelektrischer Effekt (Photoeffekt)

Röntgenspektren

Da es auch hier Maxima und Minima gibt, die Strahlung jedoch nicht sichtbar ist, muss man mit einem Zählrohr (GGM-Zähler) die Intensität (Impulse) messen. Man durchfährt langsam alle Reflexionswinkel und misst Maxi- und Minima (Debye-Scherrer-Verfahren). Man kann Röntgenstrahlen auch an Fluoreszenzbildschirmen sichtbar machen, jedoch ist eine Messung damit nicht möglich.

Man erkennt die Entstehung des Röntgenspektrums. Die Bremsstrahlung bildet den unteren, **kontinuierlichen** Teil ohne hohe Peaks. Die starken Amplituden bilden die **charakteristischen** Linien des Anodenmaterials, gegen die die Elektronen prallen. Es werden bei bestimmten Wellenlängen (also Frequenzen \rightarrow Energie) Elektronen auf den Schalen auf ein höheres Energieniveau gehoben, das sie aber nicht lange halten können. Beim Quantensprung zurück auf das alte Energieniveau, wird Energie in Form von zusätzlichen elektromagnetischen Photonen frei, die die Ausschläge im Spektrum erzeugen.



Lichtelektrischer Effekt (Photoeffekt)

Röntgenspektren

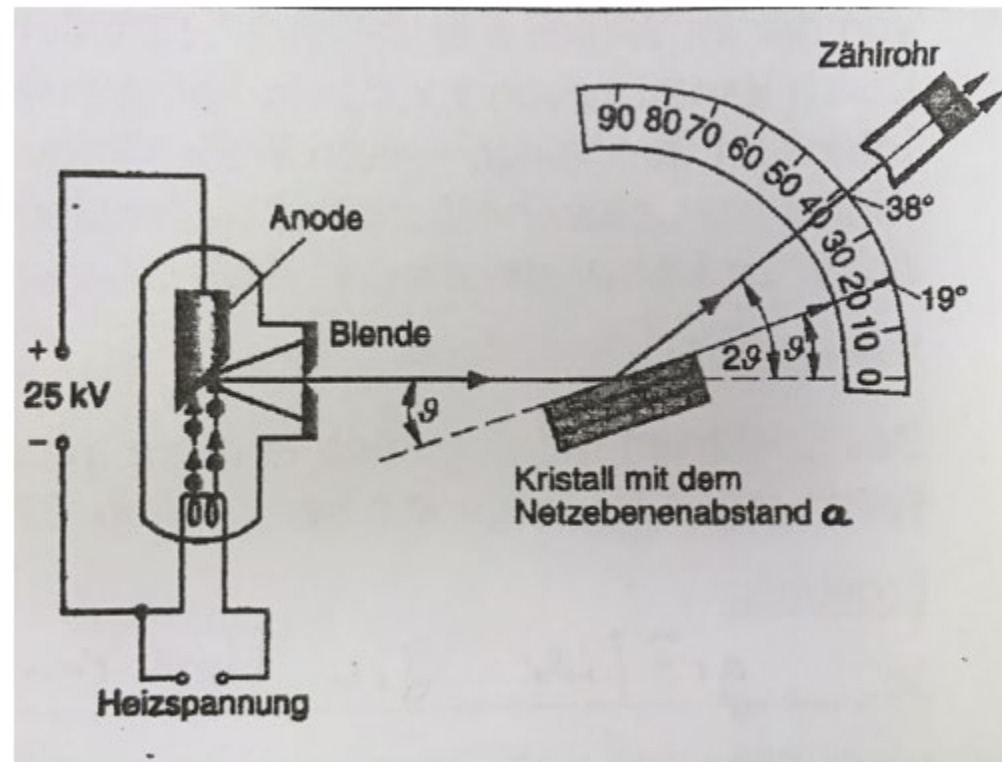


Abbildung 19: Aufbau der Röntgenspektrenanalyse



Lichtelektrischer Effekt (Photoeffekt)

Röntgenspektren

Die Röntgenröhre (vergleiche Abbildung [19](#)) besteht aus zwei Teilen. Auf der linken Seite werden Elektronen mit einer Heizspannung emittiert und anschließen mit hier 25kV beschleunigt. Die Elektronen mit der Energie $E_{kin} = Q \cdot U = e \cdot U$ treffen auf die 45° angeschrägte Anode. Dabei entsteht die sogenannte Bremsstrahlung. Diese wird nun auf einen Kristall gerichtet, der nach der Bragg-Bedingung genau eine Wellenlänge reflektiert. Diese kann mit einem Zählrohr gemessen werden. Führt man dies für alle Winkel $0 < \vartheta \leq \pi$ und verschiedene Beschleunigungsspannungen durch, erhält man die in Abbildung [20](#) dargestellten Graphen.



Lichtelektrischer Effekt (Photoeffekt)

Röntgenspektren

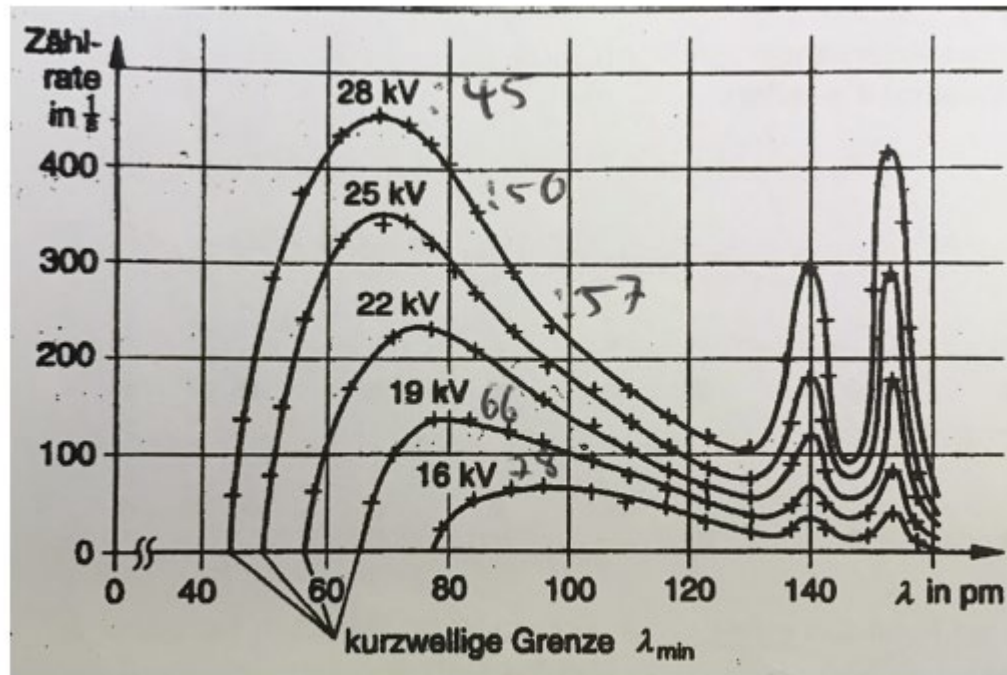
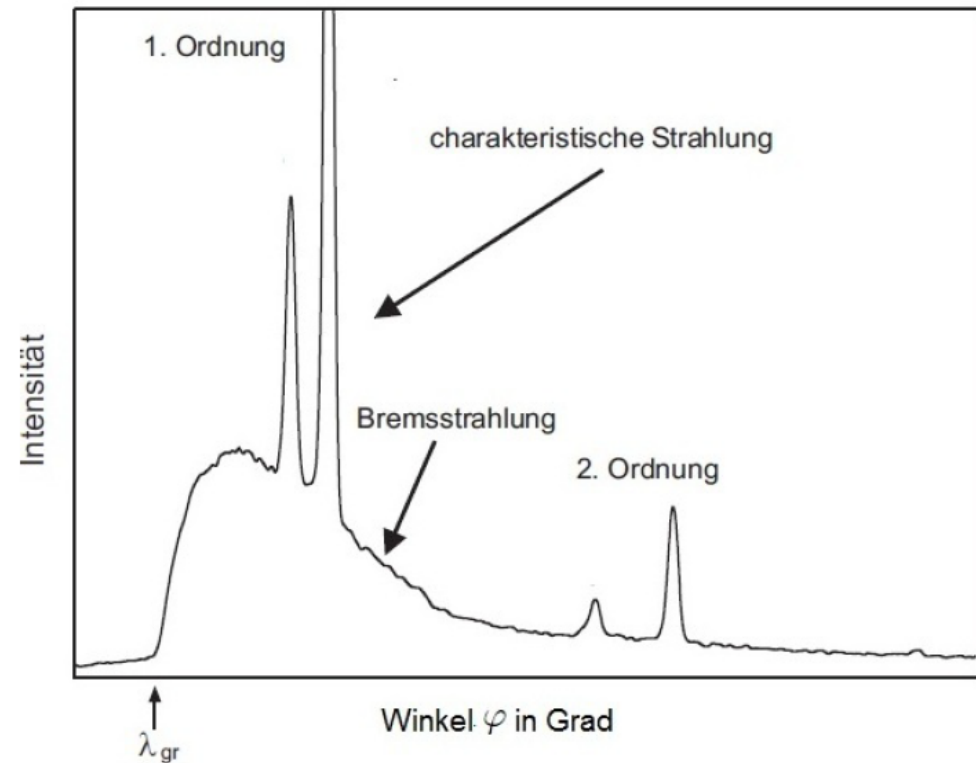


Abbildung 20: Auswertung der Röntgenröhre





Lichtelektrischer Effekt (Photoeffekt)

Röntgenspektren

Man kann erkennen, dass es eine minimale Wellenlänge λ_{min} gibt. Offensichtlich erhält ein Photon eine maximale Energiemenge. Durch den Energieerhaltungssatz ist bekannt, dass dies maximal $E_{ph} = E_{kin}$ sein kann. Nun kann man die minimale Wellenlänge folgendermaßen bestimmen:

$$\begin{aligned}\lambda_{min} &= \frac{c}{f_{max}} \\ &= \frac{c}{\frac{E_{kin}}{h}} \\ &= \frac{c \cdot h}{E_{kin}} \\ &= \frac{c \cdot h}{e \cdot U}\end{aligned}\tag{82}$$



Lichtelektrischer Effekt (Photoeffekt)

Röntgenspektren

Analog zum Fotoeffekt sollte auch Röntgenstrahlung quantisiert sein ($W = hf$). Wir beschleunigen Elektronen mit einer Spannung U_B . Jedes Elektron erhält die Energie $E = eU_B$. Gibt ein Elektron seine **gesamte** Energie W_{max} in Form eines Photons ab, so muss gelten: $eU_B = hf$. Das entstehende Röntgenquant hat die maximalst mögliche Frequenz $f_{max} = \frac{eU_B}{h}$. Es gibt also eine minimale Wellenlänge (**Grenzwellenlänge**), ab der Röntgenstrahlung entsteht $\lambda_{min} = \frac{c}{f_{max}}$ und wo die Energie der Quanten am größten ist! Die Wellenlängengrenze ist bestimmt, durch die Beschleunigungsspannung, da diese proportional zur Frequenz ist. Das Spektrum zieht sich prinzipiell bis ins Unendliche, da die Elektronen auch extrem kleine Energieportionen abgeben können. Wir wissen, dass wie λ auch mit der Bragg-Reflexion bestimmen können. Also haben wir eine weitere Möglichkeit, h zu bestimmen:

$$h = \frac{\lambda_{min} \cdot U_B \cdot e}{c}$$



Lichtquantenhypothese

1. Die Energie elektromagnetischer Strahlung mit der Frequenz f wird durch quantisierte – also nicht teilbare Energieportionen (*Photonen*) der Größe $E_{Ph} = h \cdot f$ übertragen.
2. Ein Elektron absorbiert jeweils die Energie eines Photons.
3. Helles Licht, also Licht mit hoher Intensität hat mehr Photonen, nicht aber Photonen größerer Energie.
4. Energiereiches (kurzwelliges) Licht hat Photonen größerer Energie.



Masse und Impuls von Photonen

Legt man die von Einstein veröffentlichte Gleichung $E = m \cdot c^2$ zugrunde kann man folgendermaßen die Masse und den Impuls eines Photons berechnen:

$$\begin{aligned} E &= m \cdot c^2 \\ m &= \frac{E}{c^2} \\ &= \frac{h \cdot f}{c^2} \end{aligned} \tag{83}$$



Masse und Impuls von Photonen

Die Masse kann man nachweisen, indem man die Rotverschiebung von Photonen, die sich von einer großen Masse wie einem Stern entfernen, zeigt. Dies passiert, da sie von der Gravitation beeinflusst werden und sich ihre kinetische Energie verändert.

Nun kann man auch mit der Gleichung $p = m \cdot v$ aus der klassischen Mechanik den Impuls bestimmen:

$$\begin{aligned} p &= m \cdot v \\ &= \frac{h \cdot f}{c^2} \cdot c \\ &= \frac{h \cdot f}{c} \\ &= \frac{h}{\lambda} \end{aligned} \tag{84}$$



Compton-Effekt

Mit Einstein's $E = mc^2$ gilt folgende Überlegung für Masse und Impuls eines Photons:

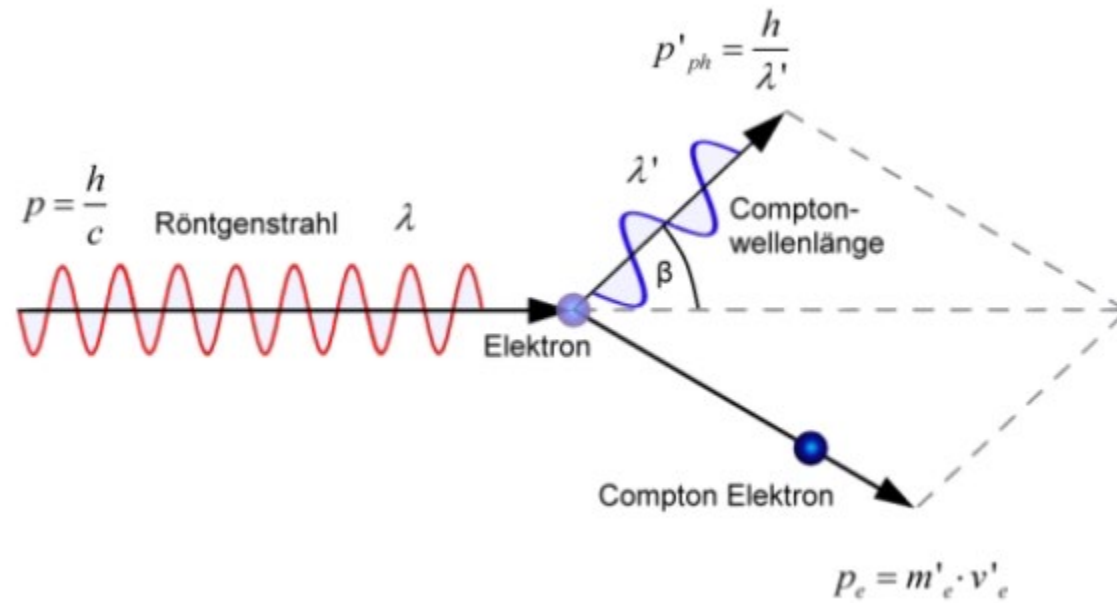
$$W_L = hf \rightarrow E = W_L \rightarrow mc^2 = hf \Rightarrow m_{ph} = \frac{h \cdot f}{c^2}$$

Für einen Impuls $p = mv$ gilt: $p_{ph} = m_{ph} \cdot v = m_{ph} \cdot c$. Einsetzen von m_{ph} :

$p_{ph} = \frac{hf}{c^2} \cdot c$ gekürzt: $p_{ph} = \frac{hf}{c} = \frac{h}{\lambda}$. Soviel zu theoretischen Herleitung. Einem Photon kann also trotz Wellenbetrachtung ein Impuls UND eine Masse zugeordnet werden, die sich aus Größen für Wellen zusammensetzen! Der Compton-Effekt beweist die Existenz von Photonen als Teilchen, da sie sich manchmal wie klassische Objekte der newton'schen Mechanik verhalten.



Compton-Effekt





Compton-Effekt

In der Abbildung ist der Zusammenstoß eines Röntgenquants mit einem Elektron dargestellt. Nach dem Zusammenstoß verliert es gemäß Energieerhaltungssatz Energie und gemäß Impulserhaltungssatz Teile des Impulses. Die verlorene Energie (Impuls) werden an das Elektron weitergegeben. Da Energie abgegeben wurde, verringert sich die Frequenz des Quants und somit die Wellenlänge. Die Differenz von Wellenlänge vor und nach Zusammenstoß: $\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \lambda_c - (\cos \beta)$ (empirisches Messergebnis). λ_c bezeichnet die sogenannte Compton-Wellenlänge eines Photons. Mit $p_{ph} = \frac{h}{\lambda}$ ergibt sich:

$$m_e \cdot d = \frac{h}{\lambda_c} \Rightarrow \lambda_c = \frac{h}{m_e c}$$



Elektronenbeugung

Beugung und Interferenz treten auch bei Elektronen auf. Der Physiker De Broglie überlegte, wenn man Photonen eine Wellenlänge zuordnen kann, sicher gilt dies auch für Elektronen (Teilchenbetrachtung!). Mit dem Impuls $p = mv$: $\lambda_B = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$. Man nutzt wieder das Debye-Scherrer-Verfahren und die Bragg'sche Reflexionsbedingung. Elektronen werden mit einer Beschleunigungsspannung U_B in die Elektronenröhre geschossen und am Graphitkristall unter einem bestimmten Winkel gebeugt Herleitung:



Elektronenbeugung

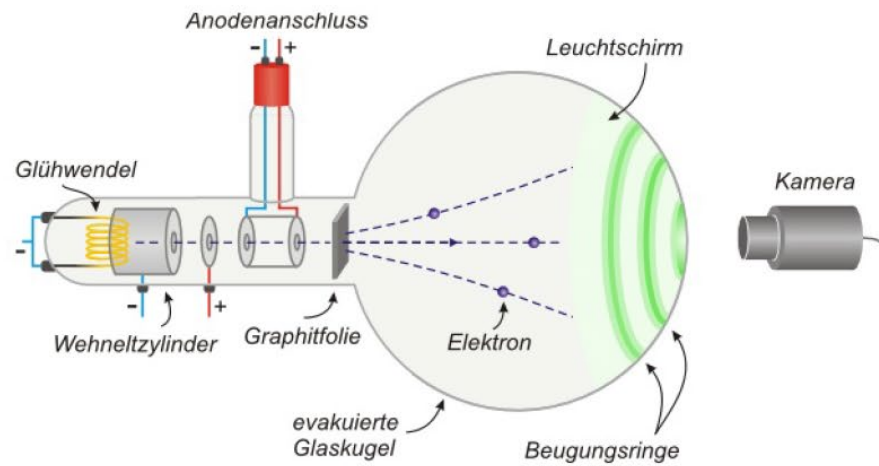


Abb.1: Elektronenbeugungsröhre mit den Beugungsringen

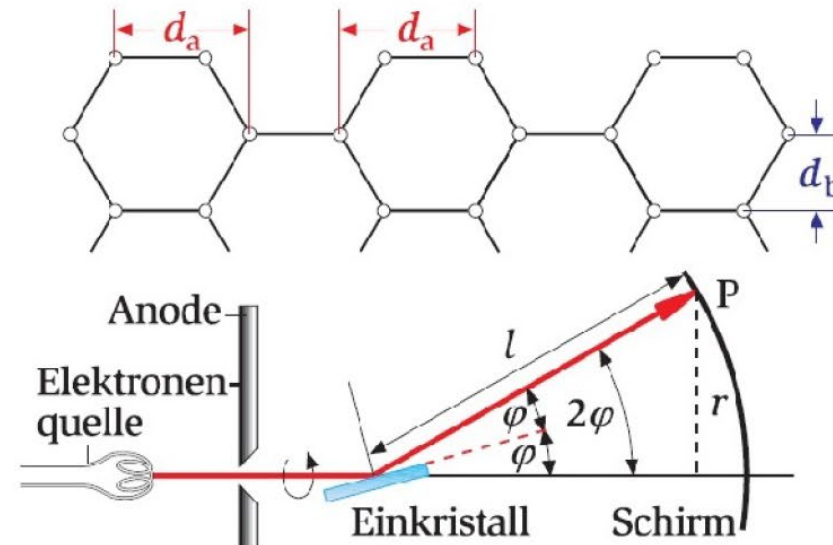


Abb.2: Netzebenen und Bragg-Reflexion am Einkristall



Elektronenbeugung

Aus Abb. 2. entnimmt man: $\sin 2\varphi = \frac{r}{l}$ φ ist sehr klein ($\leq 10^\circ$), es gilt in Näherung:
 $\sin 2\varphi \approx 2 \cdot \sin \varphi$. Mit Bragg:

$\delta = 2 \cdot \sin \varphi \cdot d$, (mit $\delta = k\lambda$), wird $2 \sin \varphi = \frac{r}{l}$ eingesetzt:

$$2 \sin \varphi = \frac{kr}{l} = \frac{k\lambda_B}{d} \Rightarrow \lambda_B = \frac{2 \sin \varphi \cdot d}{k} = \frac{rd}{lk}$$



Elektronenbeugung

Elektronen interferieren folglich. Das ist paradox, denn man muss also Elektronen als Welle und als Teilchen betrachten. In manchen Fällen verhalten sie sich wie Teilchen, in anderen wie Wellen (siehe Welle-Teilchen-Dualismus). Auch ohne Glanzwinkel φ lässt sich die De-Broglie-Wellenlänge λ_B berechnen:

$\lambda_B = \frac{r_1 d_1}{l}$ mit ($k = 1$); selbiges geht mit dem äußeren Interferenzring, der nicht etwa eine zweite Ordnung darstellt, sondern die Beugung aus der anderen Kristallebene (r_2, d_2)!!! Überprüfen der Messwerte:

$$\lambda_B = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}; \quad v = \sqrt{\frac{2U_B e}{m_e}} \rightarrow r \sim U_A.$$



Teilchen als Quantenobjekte

Teilchen, die theoretisch ruhen können verfügen über die sogenannte "Ruhemasse". Dazu gehören z.B. Elektronen, Protonen, Neutronen, aber auch Sandkörner etc. Photonen hingegen haben keine Ruhemasse, da sie sich immer mit Lichtgeschwindigkeit c bewegen. Sie verfügen nur über eine relativistische Masse.



Teilchen als Quantenobjekte

Photonen: $\lambda(m_0 = 0)$ ($m_{rel} = \frac{p}{c}$)

Elektronen, Protonen, Sand...: $\lambda_B(m_0 > 0)$

Man kann Teilchen mit Ruhemasse also eine De-Broglie-Wellenlänge zuordnen. Einige zeigen Interferenz bei Doppelspalt- und Gitterversuchen, doch bei zu großen Teilchen muss der Spalt extrem klein sein, weshalb nur noch theoretisch Interferenz möglich ist.



Welle-Teilchen-Dualismus und Heisenberg'sche Unschärferelation

Der sogenannte **Welle-Teilchen-Dualismus** versucht zu erklären, wie sich Quantenobjekte verhalten. Auf der einen Seite beschreibt die Wellenvorstellung die Ausbreitung der Energie im Raum (z.B. Doppelspalt mit Licht, Elektronenbeugung), die Teilchenvorstellung hingegen die Adsorption oder Emission (Wechselwirkung von z.B. Elektronen/Photonen mit Materie). Quantenobjekte können sich wie beides verhalten.

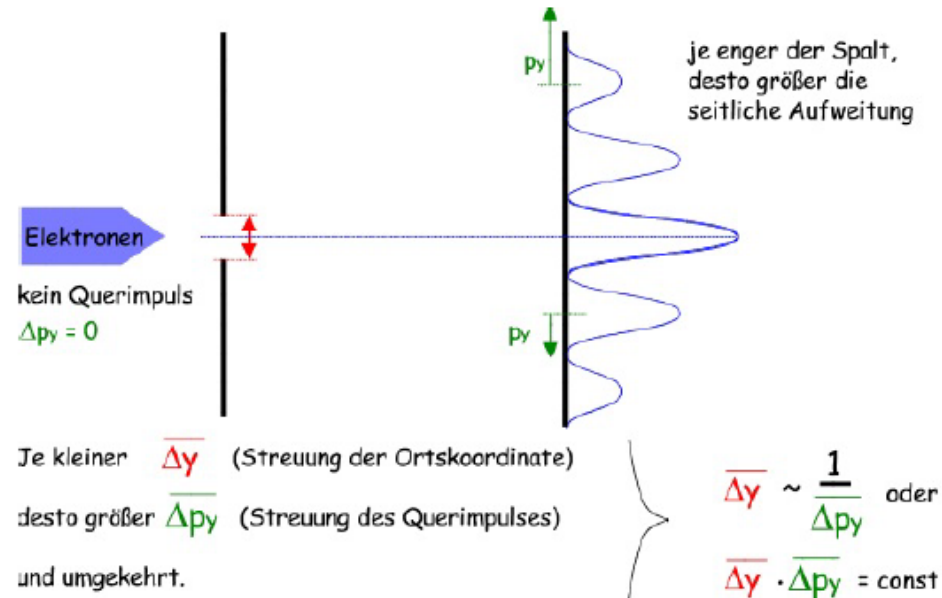


Welle-Teilchen-Dualismus und Heisenberg'sche Unschärferelation

Die von Werner Heisenberg gefundene **Unschärferelation** der Unbestimmtheitsrelation besagt, dass bestimmte Paare von Eigenschaften, wie beispielsweise Ort und Impuls, eines Teilchens nicht gleichzeitig beliebig genau gemessen werden können. Je genauer man das eine misst, desto ungenauer wird die Messung des anderen.

Wird der Ort exakt gemessen, also ohne jede Ungenauigkeit, kann man über den Impuls überhaupt keine Aussage mehr treffen. Umgekehrt gilt dasselbe. Das ist keine Folge von unausgereifter Messtechnik oder der Schusseligkeit des wissenschaftlichen Personals, sondern eine prinzipielle Eigenschaft der Natur. Diese Unbestimmtheit hängt mit dem Welle-Teilchen-Dualismus zusammen: je genauer die Position eines Photons bekannt ist, desto ungenauer kennt man seinen Impuls.

Welle-Teilchen-Dualismus und Heisenberg'sche Unschärferelation



Es gibt keine Gesamtheit von Quantenobjekten, deren Ortsstreuung $\overline{\Delta x}$ und deren Impulsstreuung $\overline{\Delta p_x}$ gleichzeitig beliebig klein sind, vielmehr existiert eine prinzipielle Grenze :

$$\overline{\Delta x} \cdot \overline{\Delta p_x} \geq \frac{h}{4\pi}$$



Welle-Teilchen-Dualismus und Heisenberg'sche Unschärferelation

Der Impuls eines Photons ist aber proportional zu seiner Wellenlänge. Je genauer also der Ort eines Photons bekannt ist, desto weniger genau kennt man seine Wellenlänge und umgekehrt. Ein monochromatischer Wellenzug also einer mit einer einzigen exakten Wellenlänge ist unendlich lang. Sein Ort ist also vollkommen unbestimmt. Da seine Wellenlänge eindeutig ist, ist sein Impuls dagegen exakt bestimmt. Hat man dagegen ein Wellenpaket mit einer sehr engen räumlichen Ausdehnung also ein Gebilde, dessen Amplitude überall außerhalb dieser Ausdehnung null ist muss dieses Wellenpaket aus sehr vielen Wellenlängen zusammengesetzt sein.



Welle-Teilchen-Dualismus und Heisenberg'sche Unschärferelation

Denn nur eine solche Überlagerung vieler Wellenlängen führt zu einer Auslöschung der Wellen außerhalb der Ausdehnung. Ein solches Wellenpaket hat also einen sehr genau bekannten Ort, aber einen unbekanntem Impuls, da es ja aus vielen Wellenlängen zusammengesetzt ist und zu jeder dieser Wellenlängen gehört ein Impuls. Nun wird man die unendlich ausgedehnte Welle am ehesten als Welle bezeichnen, das eng begrenzte Wellenpaket dagegen als Teilchen auffassen. Mit anderen Worten betrachtet man ein Photon als räumlich eingegrenztes Wellenpaket oder Teilchen, sind seine Welleneigenschaften nicht mehr feststellbar. Umgekehrt gilt das Gleiche der monochromatische Wellenzug hat keine Teilcheneigenschaften. Beides Teilchen- und Wellenbild sind jedoch nur Grenzfälle mit begrenzter Gültigkeit. Je nach Beobachtung ist das eine oder andere mehr oder weniger gültig. (Das Gesagte gilt nicht nur für Photonen auch Teilchen wie Elektronen haben Welleneigenschaften und unterliegen dem Welle-Teilchen-Dualismus.)



Eigenschaften von Photonen

1. Interferenzfähigkeit mit sich selbst
2. Interferenzmuster aus diskreten Lokalisationspunkten
3. Bestimmt (also mess- und berechenbar) ist die Verteilung der Lokalisationspunkte nach Wahrscheinlichkeitsgesetzen. Die Ermittlung erfolgt durch Zeigeraddition bei Umdeutung der resultierenden Amplitude \hat{y} zur Wahrscheinlichkeitsamplitude $|\Psi|$ und der Intensität \hat{y}^2 zur Antreffwahrscheinlichkeit $|\Psi|^2$.
4. Der Weg von der Quelle zum Lokalisationspunkt ist unbestimmt. Alle möglichen Wege sind gleichberechtigt (Superposition).

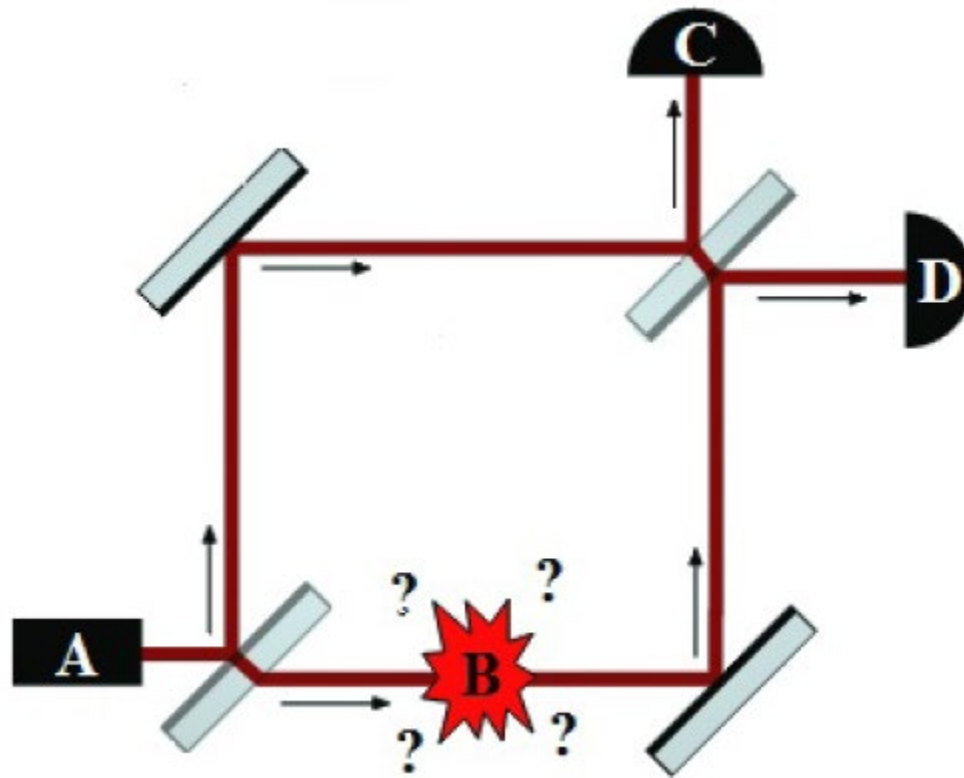


Komplementarität

Es ist nicht möglich sowohl den Weg eines Quants zu verfolgen als auch ein Interferenzbild zu erhalten. Man kann also nicht das Teilchen und Wellenmodell gleichzeitig anwenden, man braucht aber beide, da man nicht alle Effekte mit einem der beiden erklären kann.

Komplementarität

Welcher-Weg-Frage als Gedankenexperiment





Komplementarität

Um die WW-Frage zu beantworten muss eine defekte Kugel und eine heile Kugel in die Strahlengängegelegt werden. Die Frage kann beantwortet werden, da zu 50% die defekte Kugel explodiert. Nimmt das Quant also den Weg zu heilen Kugel, geschieht nichts, man weiß welcher Weg genommen wurde. Explodiert die defekte Kugel, so weiß man, das Teilchen hat diesen Weg genom-men. Da die WW-Frage beantwortet wurde, ist keine Interferenz zu beobachten,da wir das Teilchenmodell betrachten.Legen wir jedoch zwei heile Kugeln in die Strahlengänge,ist die WW-Frage nicht beantwortbar.Dadurch, dass kein Knaller zeigen kann, welchen Weg das einzelne Quant genommen hat, kommt es zur sogenannten Superposition.



Komplementarität

Quant befindet sich in einem Zwischenzustand. Es ist sowohl auf den einem Strahlengang vertreten, als auch auf dem anderen. Ein Interferenzbild entsteht, denn das Quant behält mehrere Möglichkeiten bei einen Weg zu wählen. Sobald man jedoch einen Beobachter ergänzt, geht die Superposition verloren (siehe Gedankenexperiment Schrödinger's Katze).

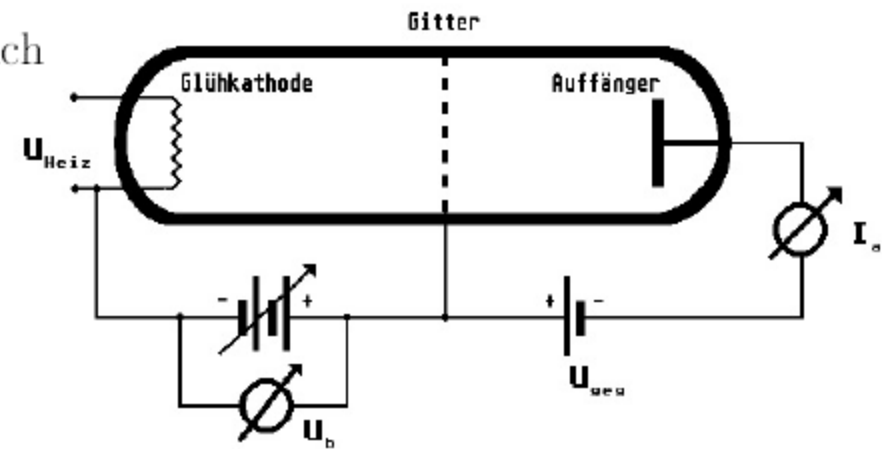


Superposition

Da die Bahn eines unteilbaren Quants zu einem Ort unbestimmt ist, müssen alle möglichen Bahnen als Rechenpfade mit λ -Zählern berücksichtigt werden. Das Superpositionsprinzip verbindet das Teilchen und das Wellenmodell miteinander.

Franck-Hertz-Versuch

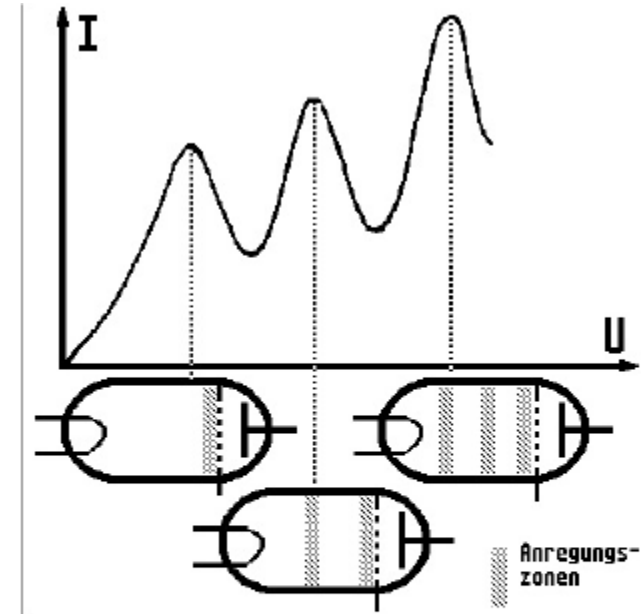
Der Franck-Hertz-Versuch beschreibt die Quantisierung der Energieniveaus von Atomen. Beim Franck-Hertz-Versuch werden gasförmige Quecksilberatome mit Elektronen beschossen. Zuerst wird die sogenannte Franck-Hertz-Röhre erhitzt (ca 180°C) um die Hg-Atome in den gasförmigen Zustand zu bringen. Elektronen werden von einer Kathode aus in Richtung der Gitteranode beschleunigt. Hinter der Gitteranode befindet sich eine negative geladene Auffängerplatte, die Elektronen, die bis zu ihr durchdringen abstößt.





Franck-Hertz-Versuch

Die Elektronen werden dann von der positiven Gitteranode aufgefangen. Bei hohen Beschleunigungsspannungen überwinden jedoch viele Elektronen das Feld zwischen Gitteranode und negativer Auffängerplatte. Sie prallen auf die Platte und der entstehende Strom wird mit einem Messgerät registriert (Auffängerstrom). Befinden sich nun gasförmige Quecksilberatome in der Röhre, sinkt ab bestimmten Beschleunigungsspannungen die Stromstärke rapide ab. Dreht man weiter die Spannung auf, steigt ab einer gewissen Spannung die Stromstärke auf Maximalwerte, bevor sie wieder rapide auf Minima abfällt. In der Röhre bilden sich Anregungszonen aus nicht sichtbarem UV-Licht. Je höher die Beschleunigungsspannung, umso mehr Anregungszonen entstehen. Sie wandern immer weiter zur Glühkathode.





Franck-Hertz-Versuch

Die UV-Erscheinungen und die Stromstärkeminima lassen sich dadurch erklären, dass die Elektronen ihre Energie an die Quecksilberatome durch vollkommen unelastische Stöße abgegeben haben. Danach haben sie nicht mehr genug Energie, den Auffängerplatte zu erreichen, es wird weniger Strom registriert. Es fällt auf, dass es nur bei ganz bestimmten Spannungswerten, also Energiewerten zu einem Stromstärkeabfall kommt. Die Quecksilberatome nehmen folglich nur diskrete, also gequantelte Energiewerte auf. Haben die Elektronen nicht genug Energie, um diese Werte zu erfüllen, kommt es nicht zu unelastischen, sondern zu vollkommen elastischen Stößen, die dadurch gekennzeichnet sind, dass es zu keiner Energieabgabe kommt (das Elektron prallt gegen ein Quecksilberatom und nimmt seine gesamte Energie wieder mit). Erhöht man die Beschleunigungsspannung weiter, so haben die Elektronen genug Energie, um mehrere unelastische Stöße durchzuführen.



Franck-Hertz-Versuch

Sie prallen gegen ein Atom, geben ihre Energie ab, werden wieder beschleunigt und prallen wieder gegen ein Atom unter Energieabgabe. Dadurch entstehen bei höherer Spannung (=Energie) immer mehr Anregungszonen, da die Elektronen schon nach einer kurzen Strecke stark genug beschleunigt wurden, um Energie abzugeben. Die Minima im Stromstärke-Spannungs-Diagramm zeigen die Spannungswerte an, bei denen es zu den meisten unelastischen Stößen kommt. Nicht alle Elektronen werden gleich beschleunigt, wodurch sich ihre Energiewerte unterscheiden können. An den Stellen der Minima haben jedoch die meisten Elektronen die richtige Energie durch Beschleunigung erfahren, wodurch die wenigsten zur Auffängerplatte durchkommen. Es muss ebenso nicht zwingend zu Stößen kommen. Einzelne Elektronen können das Atomgewirr durchdringen, ohne an ein Quecksilberatom gestoßen zu sein. Dadurch steigt die Stromstärke auch bei den Minima kontinuierlich an. Die Maxima sind Orte, an denen es zu den wenigsten unelastischen Stößen kommt, da hier fast keine Elektronen die nötige Energie zur Anregung der Quecksilberatome tragen.



Franck-Hertz-Versuch

Das UV-Leuchten der Anregungszonen kommt dadurch zustande, dass bei einem unelastischen Stoß mit einem Elektron, ein Schalenatom des Atoms auf ein höheres Niveau gehoben wird. Diesen Vorgang nennt man Quantensprung. Es gibt nur diskrete, also erlaubte Energieniveaus, auf die die Elektronen der Atome einen Quantensprung ausführen dürfen. Die Energie um ein Atom anzuregen muss genau der Differenz von einem Niveau zum nächsten Niveau entsprechen. Die Energie der Atome ist gequantelt. Dieser angehobene Zustand ist nur für einen extrem kurzen Moment existent (ca. 10^{-8} s lang). Danach springt das Elektron wieder auf ein unteres Niveau. Dazu muss es aber zur Energieabgabe kommen. Diese wird als Photon (hier im UV-Bereich) emittiert.



Quantenhafte Emission und Absorption - Energieniveauschemata

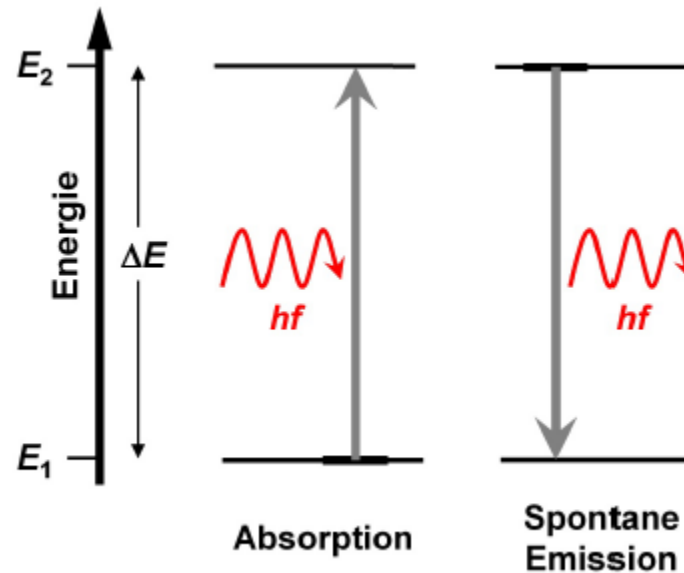
Wir haben am Franck-Hertz-Versuch gesehen, dass Atome als eine Art “Kurzzeitenergiespeicher” fungieren können. Wir ordnen ihnen diskrete Energieniveaus zu. Der unterste Zustand wird als Grundzustand E_1 oder W_1 bezeichnet und oft zu 0 eV gesetzt. Der Grundzustand ist stabil. Ein höherer Zustand wird mit E_n gekennzeichnet. Der Zustand nach E_1 ist E_2 usw. Dazwischen befinden sich Bereiche unerlaubter Energiezustände, die ein Elektron nicht einnehmen kann und darf.



Quantenhafte Emission und Absorption - Energieniveauschemata

Einen Quantensprung zwischen zwei Zuständen führt das Elektron dann aus, wenn es die Energiedifferenz durch einen Stoß mit einem Elektron, einer Anregung durch ein Photon und anderen Arten von Energiezufuhr zugeteilt bekommt. Der angeregte Zustand ist sehr kurzweilig und regt sich schnell wieder ab. Es wird ein Photon derselben Energie emittiert. Es bei bestimmten Stoffen auch zu Sprüngen über mehrere Energieniveaus kommen. Ebenso kann der Quantensprung zurück über mehrere einzelne Zustände unter Emittierung von mehreren Photonen unterschiedlichster Energien, also Wellenlängen erfolgen. Die Energie der emittierten Photonen ist $W = h \cdot f$. Die Aufnahme von Energie nennt sich Absorption.

Quantenhafte Emission und Absorption - Energieniveauschemata





Floureszenz und Phosphoreszenz

Als Floureszenz bezeichnet man die Lichtemission kalter Körper, angeregt durch einstrahlte Photonen oder durch Elektronenstöße. Im Gegensatz zur sogenannten “Resonanzfloureszenz” können bei der Floureszenz beliebig viele Quantensprünge über verschiedene Niveaus stattfinden. Die absorbierte Energie wird sozusagen “zerstückelt”.

Fluoreszenz und Phosphoreszenz

