



Diese Veranstaltung wird aufgezeichnet und als Medien-Cast über KIT - ILIAS bereit gestellt

Nur zur KIT-internen vorlesungsbegleitenden Nutzung, Weitergabe & anderweitige Verwendung ist untersagt

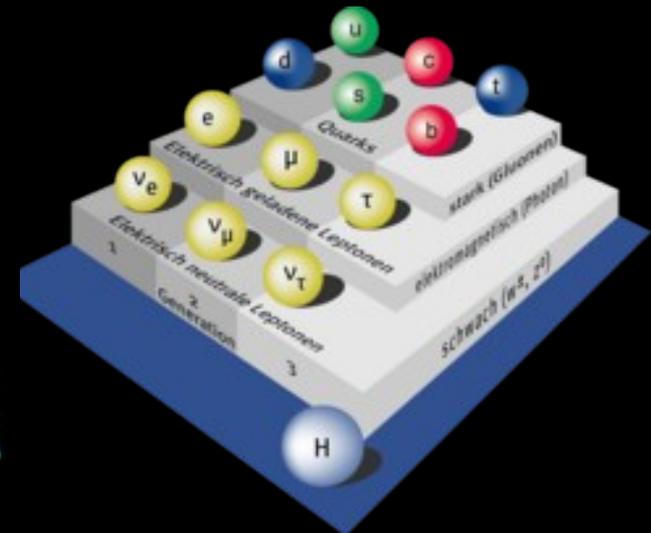
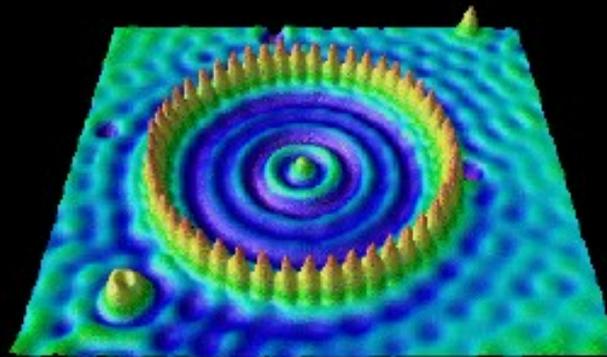
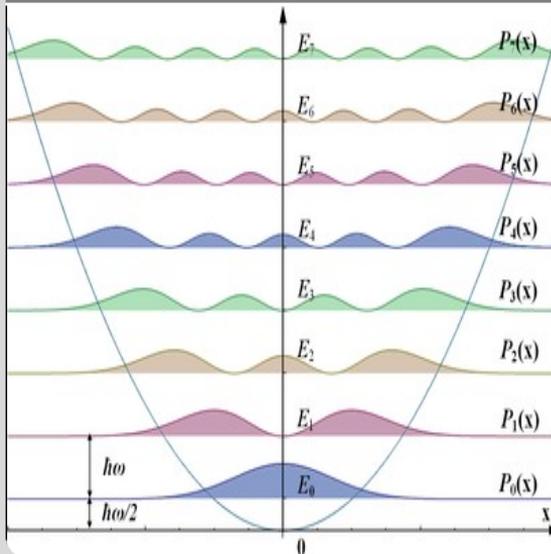
Vorlesung **Moderne Physik (L)**

Schlüsselexperimente der Quantenphysik (2)

Günter Quast

Fakultät für Physik
Institut für Experimentelle Teilchenphysik

SS '20



- Elektrische Ladung und Massen treten als Vielfache von kleinsten Einheiten auf, sie sind „quantisiert“ (Elementarladung, und, z.B. Masse des Elektrons)
- Hohlraum-Strahler (schwarzer Körper)
 - Wien'sches Verschiebungsgesetz: $\lambda_{max} \cdot T = const$
 - Stefan-Boltzmann-Gesetz: $P = \int_0^{\infty} P(\lambda, T) d\lambda \propto T^4$
 - Erklärung durch Max Planck: Energieabstrahlung / Absorption in Quanten $E = h \cdot \nu$
- Photo-Effekt
 - Kinetische Energie der ausgelösten Elektronen: $E_{kin} = h \cdot \nu - W_A$
 - W_A : Auslöseenergie (materialabhängig)
- Compton-Effekt (Streuung von Photonen an Elektronen): $\Delta\lambda = (\lambda - \lambda') = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos \theta)$
- Photon:
$$\begin{aligned} E &= h \cdot \nu = \hbar\omega \\ p &= \frac{h}{\lambda} = \hbar k \end{aligned}$$
 - $h = 6,6 \cdot 10^{-34} Js$: „Planck'sches Wirkungsquantum“
 - $\hbar = \frac{h}{2\pi}$

- 1) Einführung
- 2) Wiederholung wichtiger Konzepte der klassischen Physik
- 3) Spezielle Relativitätstheorie
- 4) **Schlüsselexperimente und Grundlagen der Quantenphysik**
- 5) Die Schrödingergleichung
- 6) Anwendungen der Schrödingergleichung
- 7) Das Wasserstoff-Atom
- 8) Atome mit mehreren Elektronen
- 9) Wechselwirkung von Licht und Materie
- 10) Grundlagen der Festkörperphysik
- 11) Kern- und Teilchenphysik
- 12) Ausblick

Erkenntnis aus der letzten Vorlesung:

Licht besteht aus „Lichtquanten“, sog. Photonen mit der Energie $E = h \cdot \nu$

Frage:

Haben Photonen mit der Energie $E = h \cdot \nu$ auch einen Impuls ?

Aus der Relativitätstheorie erwarten wir für masselos Teilchen, die sich mit Lichtgeschwindigkeit bewegen:

$$|\vec{p}| = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

Die Relativitätstheorie erlaubt Objekte, die sich mit Lichtgeschwindigkeit bewegen, wenn deren Ruhemasse Null ist – der relativistische Impuls ist dann $p = E/c$.

Die Relativitätstheorie erlaubt Objekte, die sich mit Lichtgeschwindigkeit bewegen, wenn deren Ruhemasse Null ist – der relativistische Impuls ist dann $p = E/c$.

Frage: haben Photonen einen Impuls ?

Die Relativitätstheorie erlaubt Objekte, die sich mit Lichtgeschwindigkeit bewegen, wenn deren Ruhemasse Null ist – der relativistische Impuls ist dann $p = E/c$.

Frage: haben Photonen einen Impuls ?

Klassische Vorstellung: Licht regt (freie oder schwach gebundene) Elektronen zu Schwingungen an

Die Relativitätstheorie erlaubt Objekte, die sich mit Lichtgeschwindigkeit bewegen, wenn deren Ruhemasse Null ist – der relativistische Impuls ist dann $p = E/c$.

Frage: haben Photonen einen Impuls ?

Klassische Vorstellung: Licht regt (freie oder schwach gebundene) Elektronen zu Schwingungen an

Comptons Experiment:

Streuung von Photonen an schwach gebundenen Elektronen

Trick: man verwendet Röntgen- oder Gamma-Strahlung, dann spielt die Bindungsenergie keine Rolle.

Die Relativitätstheorie erlaubt Objekte, die sich mit Lichtgeschwindigkeit bewegen, wenn deren Ruhemasse Null ist – der relativistische Impuls ist dann $p = E/c$.

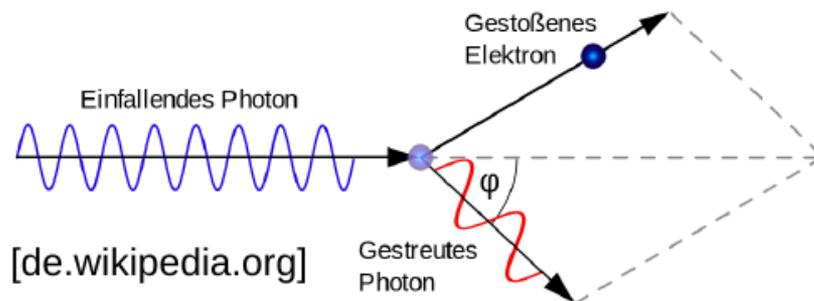
Frage: haben Photonen einen Impuls ?

Klassische Vorstellung: Licht regt (freie oder schwach gebundene) Elektronen zu Schwingungen an

Comptons Experiment:

Streuung von Photonen an schwach gebundenen Elektronen

Trick: man verwendet Röntgen- oder Gamma-Strahlung, dann spielt die Bindungsenergie keine Rolle.



Die Relativitätstheorie erlaubt Objekte, die sich mit Lichtgeschwindigkeit bewegen, wenn deren Ruhemasse Null ist – der relativistische Impuls ist dann $p = E/c$.

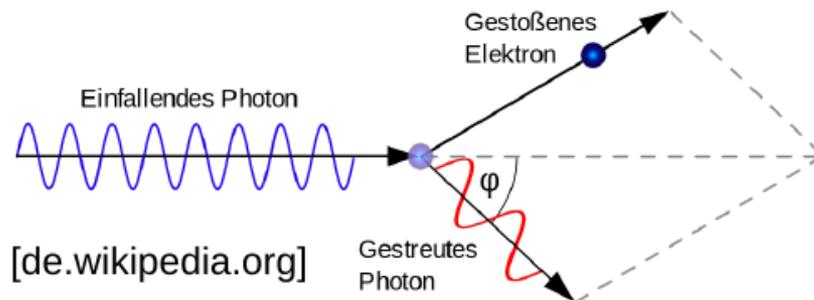
Frage: haben Photonen einen Impuls ?

Klassische Vorstellung: Licht regt (freie oder schwach gebundene) Elektronen zu Schwingungen an

Comptons Experiment:

Streuung von Photonen an schwach gebundenen Elektronen

Trick: man verwendet Röntgen- oder Gamma-Strahlung, dann spielt die Bindungsenergie keine Rolle.



Die Relativitätstheorie erlaubt Objekte, die sich mit Lichtgeschwindigkeit bewegen, wenn deren Ruhemasse Null ist – der relativistische Impuls ist dann $p = E/c$.

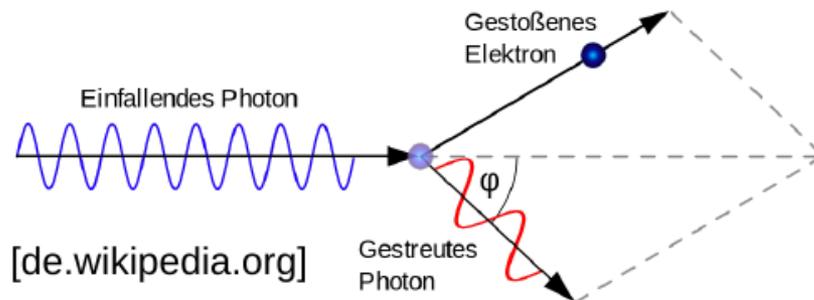
Frage: haben Photonen einen Impuls ?

Klassische Vorstellung: Licht regt (freie oder schwach gebundene) Elektronen zu Schwingungen an

Comptons Experiment:

Streuung von Photonen an schwach gebundenen Elektronen

Trick: man verwendet Röntgen- oder Gamma-Strahlung, dann spielt die Bindungsenergie keine Rolle.



Video:
Compton-Effekt

[Link zum Video](#)

Im Gegensatz zur klassischen Erwartung:

- $\lambda = \lambda'$
- Isotrope Abstrahlung

Im Gegensatz zur klassischen Erwartung:

- $\lambda = \lambda'$
- Isotrope Abstrahlung

Beobachtung

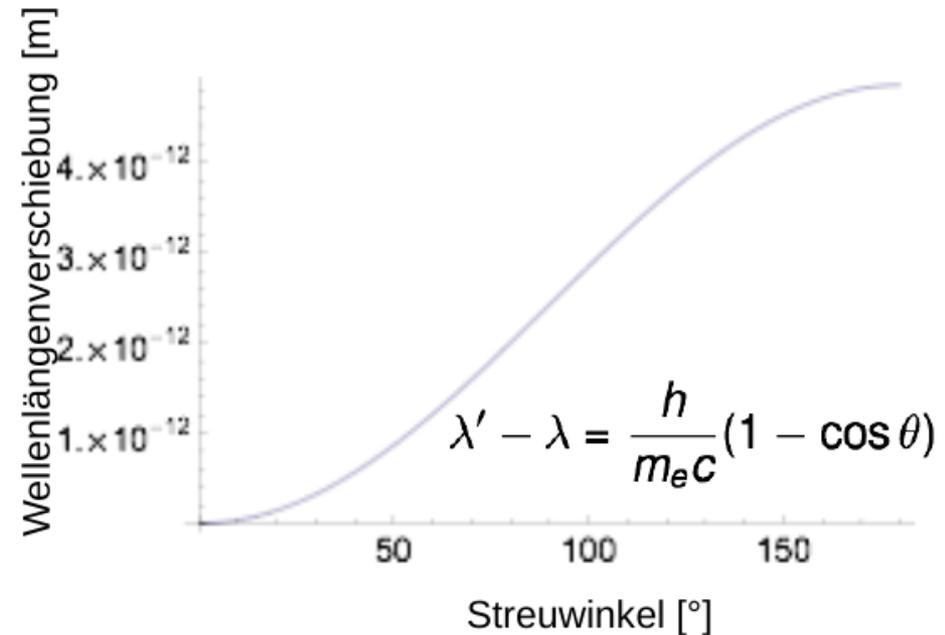
- Gestreutes Licht enthält neben λ eine weitere Wellenlänge $\lambda' > \lambda \rightarrow$ (Energieverlust, inelast. Streuung).
- Zweite Wellenlänge ist Funktion des Streuwinkels:
$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \lambda_C(1 - \cos \Theta)$$
- Die Abstrahlung ist nicht isotrop
- Effekt ist unabhängig vom Probematerial.

Im Gegensatz zur klassischen Erwartung:

- $\lambda = \lambda'$
- Isotrope Abstrahlung

Beobachtung

- Gestreutes Licht enthält neben λ eine weitere Wellenlänge $\lambda' > \lambda \rightarrow$ (Energieverlust, inelast. Streuung).
- Zweite Wellenlänge ist Funktion des Streuwinkels: $\Delta\lambda = \lambda' - \lambda$
$$= \lambda_C(1 - \cos \Theta)$$
- Die Abstrahlung ist nicht isotrop
- Effekt ist unabhängig vom Probematerial.

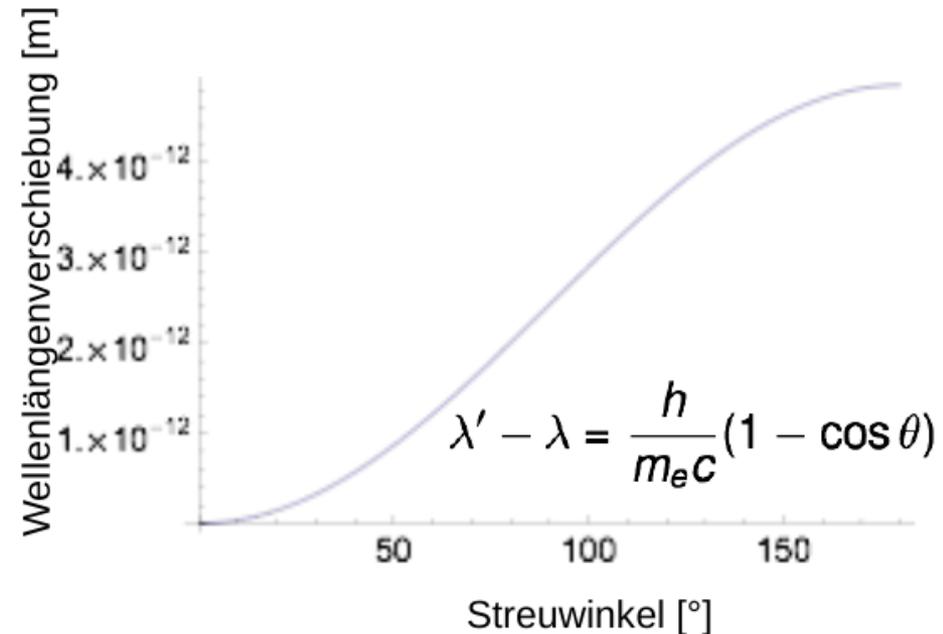


Im Gegensatz zur klassischen Erwartung:

- $\lambda = \lambda'$
- Isotrope Abstrahlung

Beobachtung

- Gestreutes Licht enthält neben λ eine weitere Wellenlänge $\lambda' > \lambda \rightarrow$ (Energieverlust, inelast. Streuung).
- Zweite Wellenlänge ist Funktion des Streuwinkels: $\Delta\lambda = \lambda' - \lambda$
$$= \lambda_C(1 - \cos \Theta)$$
- Die Abstrahlung ist nicht isotrop
- Effekt ist unabhängig vom Probematerial.



Erklärung durch Lichtquantenhypothese:

Relativistischer Stoß eines Photons mit einem ruhenden Elektron

Vor dem Stoß:

mit $E_\gamma/c = h \cdot \nu/c = h/\lambda$

$$\tilde{\mathbf{p}}_\gamma = \begin{pmatrix} E_\gamma/c \\ E_\gamma/c \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h/\lambda \\ h/\lambda \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \tilde{\mathbf{p}}_e = \begin{pmatrix} m_e c \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Vor dem Stoß: mit $E_\gamma/c = h \cdot \nu/c = h/\lambda$

$$\tilde{p}_\gamma = \begin{pmatrix} E_\gamma/c \\ E_\gamma/c \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h/\lambda \\ h/\lambda \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \tilde{p}_e = \begin{pmatrix} m_e c \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Nach dem Stoß mit Erhaltung des relativistischen Viererimpulses:

$$\tilde{P} = \begin{pmatrix} h/\lambda + m_e c \\ h/\lambda \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \tilde{P}' = \begin{pmatrix} h/\lambda' + E'_e/c \\ h/\lambda' \cos \varphi_\gamma + p'_e \cos \varphi_e \\ h/\lambda' \sin \varphi_\gamma + p'_e \sin \varphi_e \\ 0 \end{pmatrix}$$

mit $E'_e{}^2 = c^2 p'_e{}^2 + m_e^2 c^4$

Vor dem Stoß: mit $E_\gamma/c = h \cdot \nu/c = h/\lambda$

$$\tilde{p}_\gamma = \begin{pmatrix} E_\gamma/c \\ E_\gamma/c \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h/\lambda \\ h/\lambda \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \tilde{p}_e = \begin{pmatrix} m_e c \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Nach dem Stoß mit Erhaltung des relativistischen Viererimpulses:

$$\tilde{P} = \begin{pmatrix} h/\lambda + m_e c \\ h/\lambda \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \tilde{P}' = \begin{pmatrix} h/\lambda' + E'_e/c \\ h/\lambda' \cos \varphi_\gamma + p'_e \cos \varphi_e \\ h/\lambda' \sin \varphi_\gamma + p'_e \sin \varphi_e \\ 0 \end{pmatrix}$$

mit $E'_e{}^2 = c^2 p'_e{}^2 + m_e^2 c^4$

Damit erhalten wir drei Gleichungen; durch Eliminieren von E'_e und φ_e

→ (s. Übungsaufgabe)

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos \varphi_\gamma)$$

Vor dem Stoß: mit $E_\gamma/c = h \cdot \nu/c = h/\lambda$

$$\tilde{\mathbf{p}}_\gamma = \begin{pmatrix} E_\gamma/c \\ E_\gamma/c \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h/\lambda \\ h/\lambda \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \tilde{\mathbf{p}}_e = \begin{pmatrix} m_e c \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Nach dem Stoß mit Erhaltung des relativistischen Viererimpulses:

$$\tilde{\mathbf{P}} = \begin{pmatrix} h/\lambda + m_e c \\ h/\lambda \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \tilde{\mathbf{P}}' = \begin{pmatrix} h/\lambda' + E'_e/c \\ h/\lambda' \cos \varphi_\gamma + p'_e \cos \varphi_e \\ h/\lambda' \sin \varphi_\gamma + p'_e \sin \varphi_e \\ 0 \end{pmatrix}$$

mit $E_e'^2 = c^2 p_e'^2 + m_e^2 c^4$

Damit erhalten wir drei Gleichungen; durch Eliminieren von E'_e und φ_e

→ (s. Übungsaufgabe)

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos \varphi_\gamma)$$

Erklärung: Licht als Teilchen mit $E_\gamma = h\nu$ und $|\vec{p}| = h\nu/c = h/\lambda$

Vor dem Stoß: mit $E_\gamma/c = h \cdot \nu/c = h/\lambda$

$$\tilde{p}_\gamma = \begin{pmatrix} E_\gamma/c \\ E_\gamma/c \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h/\lambda \\ h/\lambda \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \tilde{p}_e = \begin{pmatrix} m_e c \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Nach dem Stoß mit Erhaltung des relativistischen Viererimpulses:

$$\tilde{P} = \begin{pmatrix} h/\lambda + m_e c \\ h/\lambda \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \tilde{P}' = \begin{pmatrix} h/\lambda' + E'_e/c \\ h/\lambda' \cos \varphi_\gamma + p'_e \cos \varphi_e \\ h/\lambda' \sin \varphi_\gamma + p'_e \sin \varphi_e \\ 0 \end{pmatrix}$$

mit $E'_e{}^2 = c^2 p'_e{}^2 + m_e^2 c^4$

Damit erhalten wir drei Gleichungen; durch Eliminieren von E'_e und φ_e

→ (s. Übungsaufgabe)

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos \varphi_\gamma)$$

Erklärung: Licht als Teilchen mit $E_\gamma = h\nu$ und $|\vec{p}| = h\nu/c = h/\lambda$

$\lambda_c = \frac{h}{m_e c}$ nennt man **Compton-Wellenlänge**.

Photonen zeigen Teilcheneigenschaften

- mit **Energie** $E_\gamma = h\nu$
- und **Impuls** $p_\gamma = h/\lambda (= h\nu/c)$

Photonen zeigen Teilcheneigenschaften

- mit **Energie** $E_\gamma = h\nu$
- und **Impuls** $p_\gamma = h/\lambda (= h\nu/c)$

Gleichzeitig zeigt Licht am Doppelspalt Interferenz,

also klare **Welleneigenschaften** (wie in von der Elektrodynamik vorhergesagt)

Photonen zeigen Teilcheneigenschaften

- mit **Energie** $E_\gamma = h\nu$
- und **Impuls** $p_\gamma = h/\lambda (= h\nu/c)$

Gleichzeitig zeigt Licht am Doppelspalt Interferenz,

also klare **Welleneigenschaften** (wie in von der Elektrodynamik vorhergesagt)

Klarheit bringen Experimente mit sehr schwachem Licht, bei denen sich praktisch immer nur die Energiemenge eines Photons in der Apparatur befindet.

Photonen zeigen Teilcheneigenschaften

- mit **Energie** $E_\gamma = h\nu$
- und **Impuls** $p_\gamma = h/\lambda (= h\nu/c)$

Gleichzeitig zeigt Licht am Doppelspalt Interferenz,

also klare **Welleneigenschaften** (wie in von der Elektrodynamik vorhergesagt)

Klarheit bringen Experimente mit sehr schwachem Licht, bei denen sich praktisch immer nur die Energiemenge eines Photons in der Apparatur befindet.

Früher durchgeführt mit langzeitbelichteten Filmen,

heute geht das mit modernen (Halbleiter-) Detektoren mit hoher Empfindlichkeit.

Photonen zeigen Teilcheneigenschaften

- mit **Energie** $E_\gamma = h\nu$
- und **Impuls** $p_\gamma = h/\lambda (= h\nu/c)$

Gleichzeitig zeigt Licht am Doppelspalt Interferenz,

also klare **Welleneigenschaften** (wie in von der Elektrodynamik vorhergesagt)

Klarheit bringen Experimente mit sehr schwachem Licht, bei denen sich praktisch immer nur die Energiemenge eines Photons in der Apparatur befindet.

Früher durchgeführt mit langzeitbelichteten Filmen,

heute geht das mit modernen (Halbleiter-) Detektoren mit hoher Empfindlichkeit.

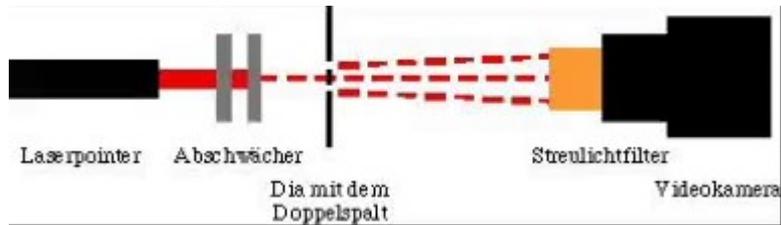


**Video: Einzelphotonen
am Doppelspalt**

Einzelne Frames aus dem Video:

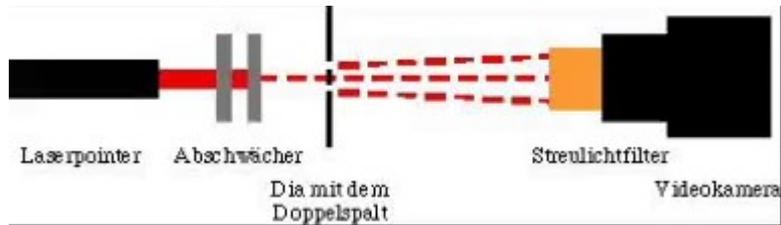
Einzelne Frames aus dem Video:

1. Experimenteller Aufbau

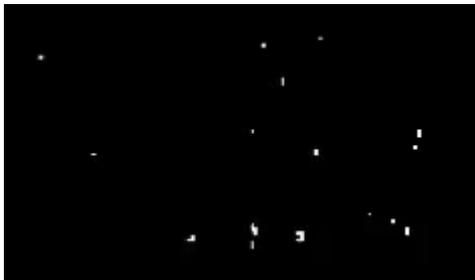


Einzelne Frames aus dem Video:

1. Experimenteller Aufbau

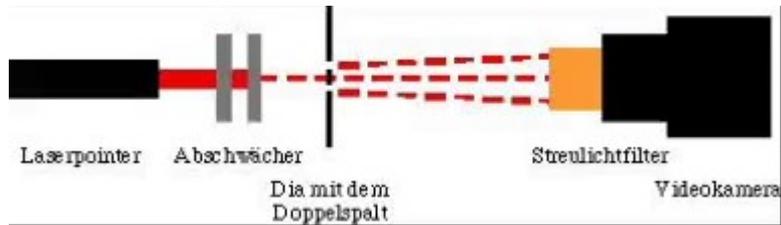


2. Einzelbilder

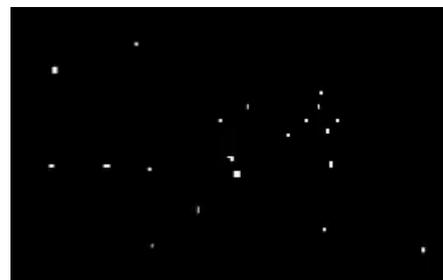


Einzelne Frames aus dem Video:

1. Experimenteller Aufbau

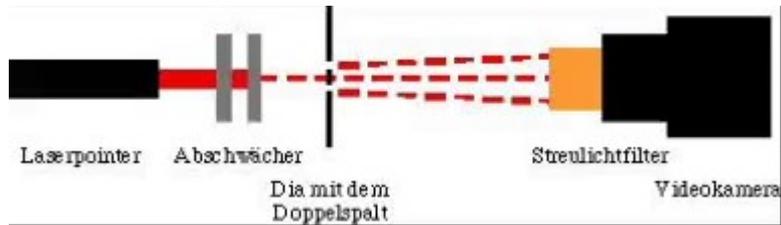


2. Einzelbilder

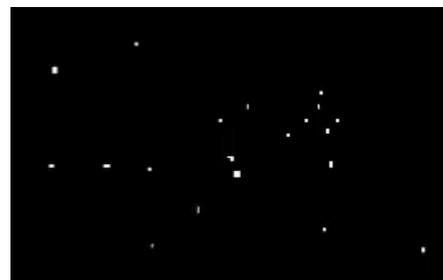


Einzelne Frames aus dem Video:

1. Experimenteller Aufbau

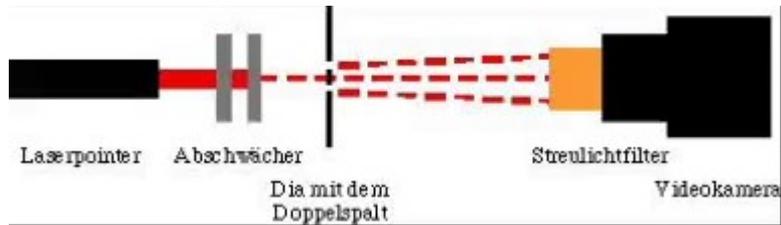


2. Einzelbilder



Einzelne Frames aus dem Video:

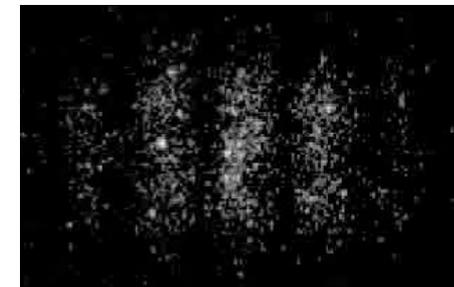
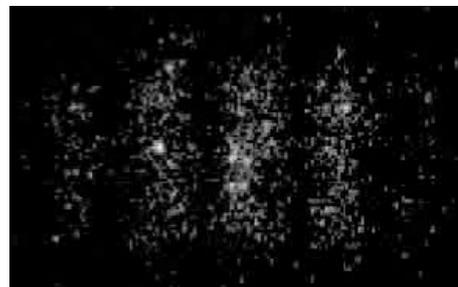
1. Experimenteller Aufbau



2. Einzelbilder

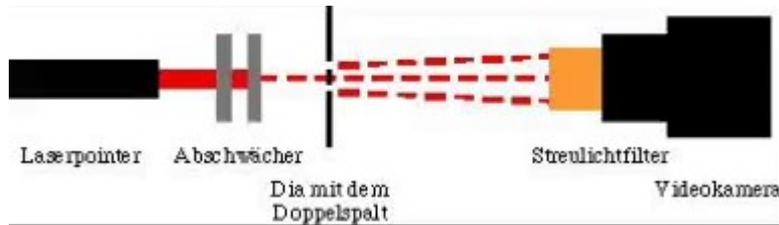


3. Überlagerte Bilder

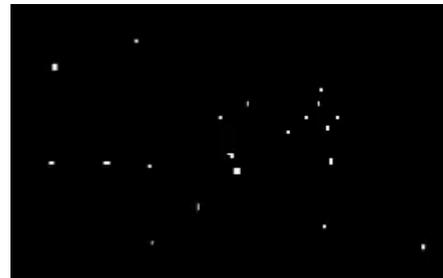


Einzelne Frames aus dem Video:

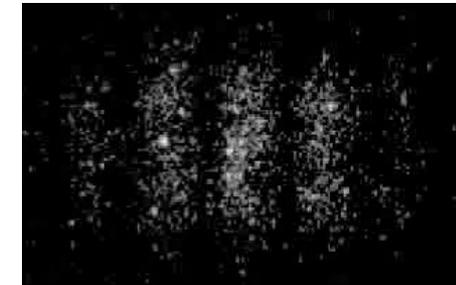
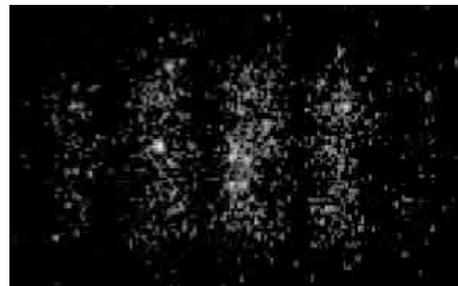
1. Experimenteller Aufbau



2. Einzelbilder



3. Überlagerte Bilder



**Doppelspaltmuster als Häufigkeitsverteilung
der Auftrefforte der Photonen !**



Die **Flammenprobe** wurde in der Chemie schon früh im 19 Jhdt. zur Nachweise chemischer Elemente genutzt.





Die **Flammenprobe** wurde in der Chemie schon früh im 19 Jhdt. zur Nachweise chemischer Elemente genutzt.



Schaut man sich das Licht genauer an, nämlich mit einem Spektrometer, erlebt man eine Überraschung:



Video: Flammenfärbung durch Metallsalze

[Link zum Video](#)



Die **Flammenprobe** wurde in der Chemie schon früh im 19 Jhdt. zur Nachweise chemischer Elemente genutzt.



Schaut man sich das Licht genauer an, nämlich mit einem Spektrometer, erlebt man eine Überraschung:

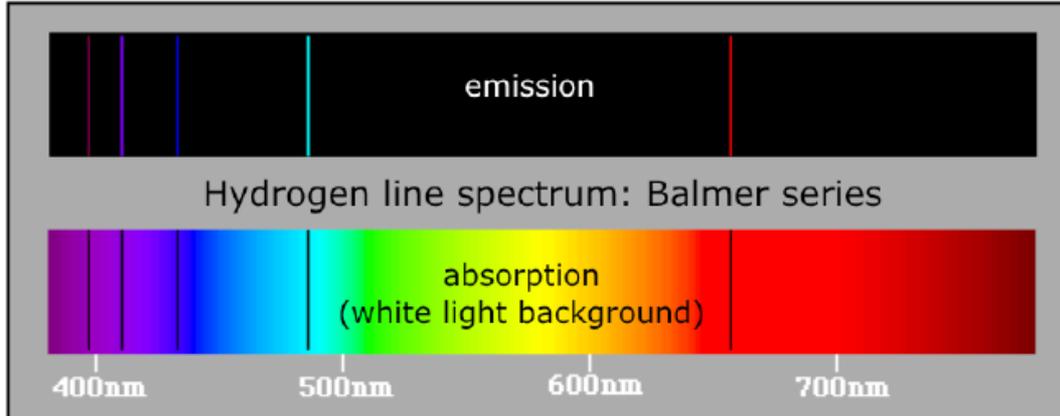


Video: Flammenfärbung durch Metallsalze

[Link zum Video](#)

Statt eines kontinuierlichen Spektrums, wie z.B. bei Sonnenlicht, treten scharfe, monochromatische **Linien** im Spektrum auf, die für **jedes Element charakteristisch** sind.

[\[http://www.chem1.com\]](http://www.chem1.com)



Emissions- und Absorptionslinien (hier Wasserstoff)



Die **Flammenprobe** wurde in der Chemie schon früh im 19 Jhdt. zum Nachweise chemischer Elemente genutzt.



Schaut man sich das Licht genauer an, nämlich mit einem Spektrometer, erlebt man eine Überraschung:

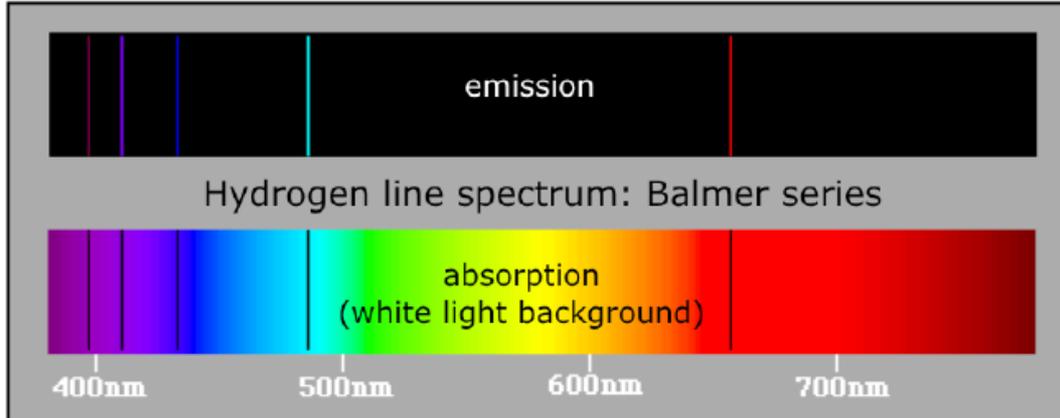


Video: Flammenfärbung durch Metallsalze

[Link zum Video](#)

Statt eines kontinuierlichen Spektrums, wie z.B. bei Sonnenlicht, treten scharfe, monochromatische **Linien** im Spektrum auf, die für **jedes Element charakteristisch** sind.

[\[http://www.chem1.com\]](http://www.chem1.com)



Emissions- und Absorptionslinien (hier Wasserstoff)



Johann J. Balmer



Die **Flammenprobe** wurde in der Chemie schon früh im 19 Jhdt. zur Nachweise chemischer Elemente genutzt.



Schaut man sich das Licht genauer an, nämlich mit einem Spektrometer, erlebt man eine Überraschung:

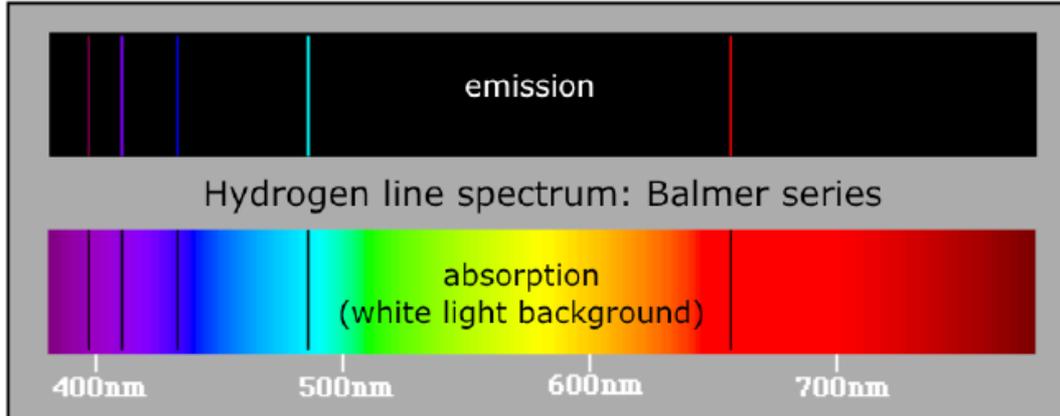


Video: Flammenfärbung durch Metallsalze

[Link zum Video](#)

Statt eines kontinuierlichen Spektrums, wie z.B. bei Sonnenlicht, treten scharfe, monochromatische **Linien** im Spektrum auf, die für **jedes Element charakteristisch** sind.

[\[http://www.chem1.com\]](http://www.chem1.com)



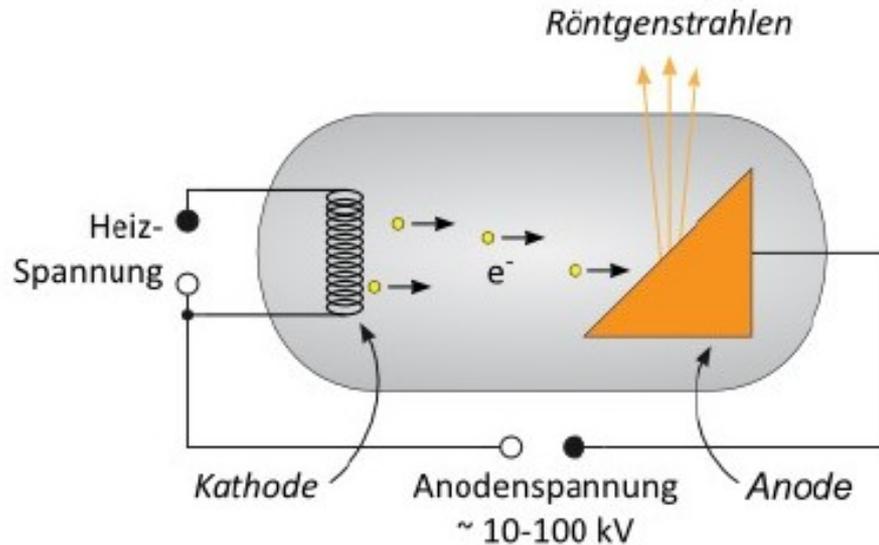
Emissions- und Absorptionslinien (hier Wasserstoff)



Johann J. Balmer

- Empirische Formel (Balmer, 1885): $\lambda = \lambda_0 \left(\frac{n^2}{n^2 - 4} \right)$ mit $\lambda_0 = 364.56 \text{ nm}$
- Klassische Physik: **keine Erklärung !**

Schematischer Aufbau Röntgenröhre

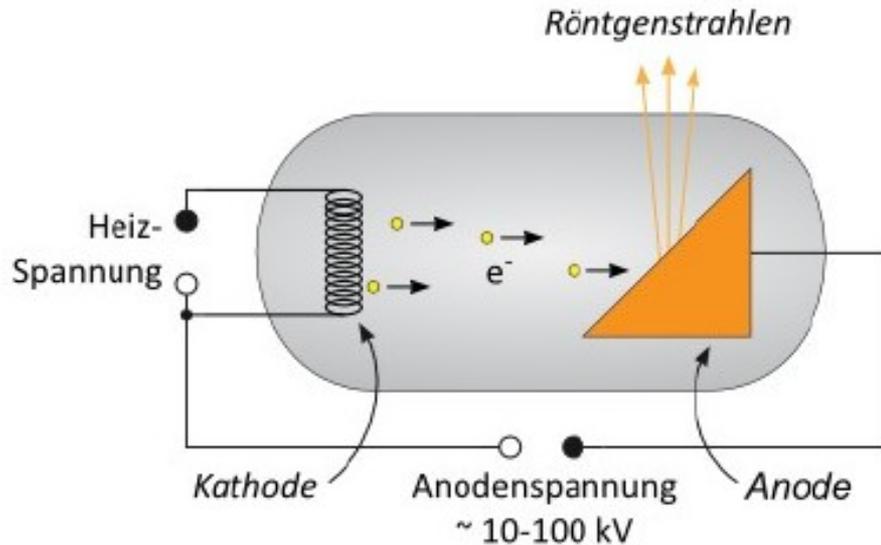


Röntgenstrahlung entsteht, wenn stark beschleunigte Elektronen beim Auftreffen auf ein Material abgebremst werden.

Maximalenergie der Strahlung:

$$E_{\max} = h\nu_{\max} = e \cdot U$$

Schematischer Aufbau Röntgenröhre

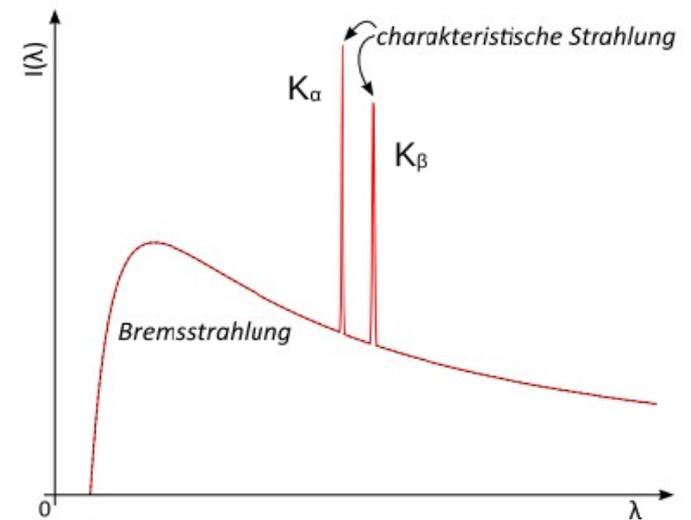


Röntgenstrahlung entsteht, wenn stark beschleunigte Elektronen beim Auftreffen auf ein Material abgebremst werden.

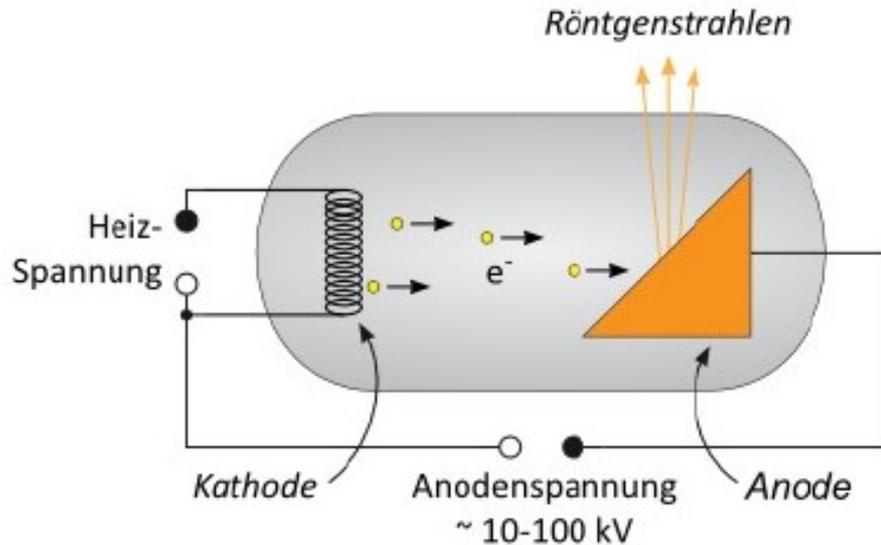
Maximalenergie der Strahlung:

$$E_{\max} = h\nu_{\max} = e \cdot U$$

Im Spektrum der emittierten Röntgenstrahlung beobachtet man zusätzlich zu einem kontinuierlichen Anteil **scharfe Linien**



Schematischer Aufbau Röntgenröhre

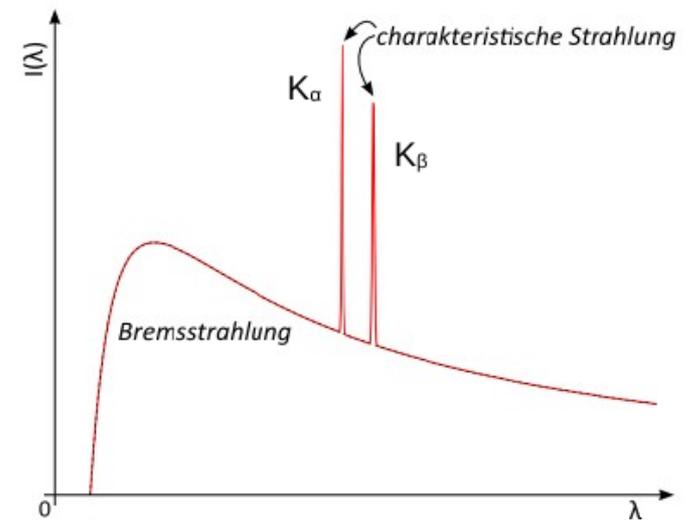


Röntgenstrahlung entsteht, wenn stark beschleunigte Elektronen beim Auftreffen auf ein Material abgebremst werden.

Maximalenergie der Strahlung:

$$E_{\max} = h\nu_{\max} = e \cdot U$$

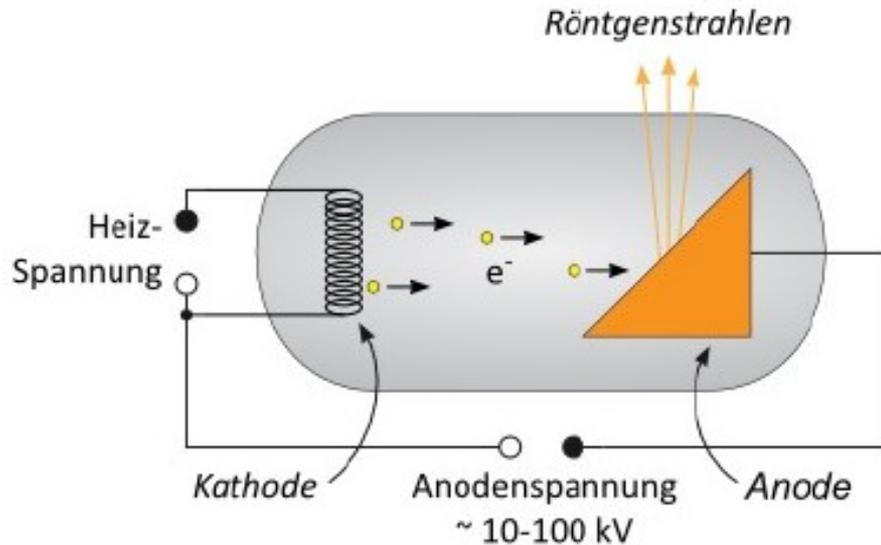
Im Spektrum der emittierten Röntgenstrahlung beobachtet man zusätzlich zu einem kontinuierlichen Anteil **scharfe Linien**



[ip.uni-goettingen.de]

- Linien abhängig von Anodenmaterial
- Klassische Physik: **keine Erklärung!**

Schematischer Aufbau Röntgenröhre



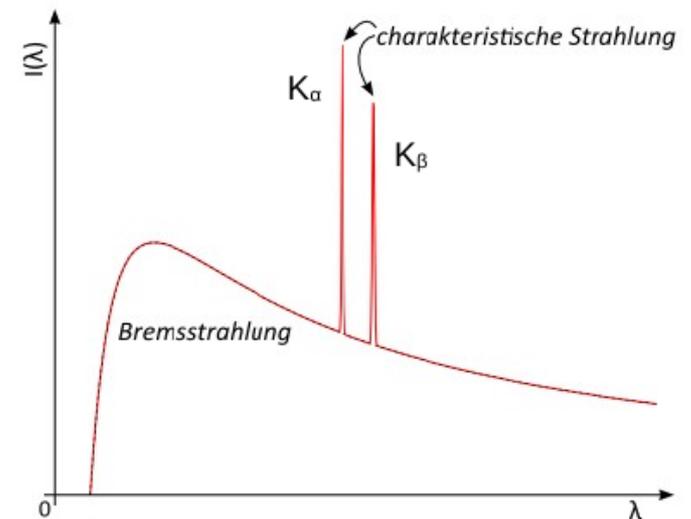
Röntgenstrahlung entsteht, wenn stark beschleunigte Elektronen beim Auftreffen auf ein Material abgebremst werden.

Maximalenergie der Strahlung:

$$E_{\max} = h\nu_{\max} = e \cdot U$$

Verfahren zur Messung der Wellenlänge von Röntgenstrahlung → später

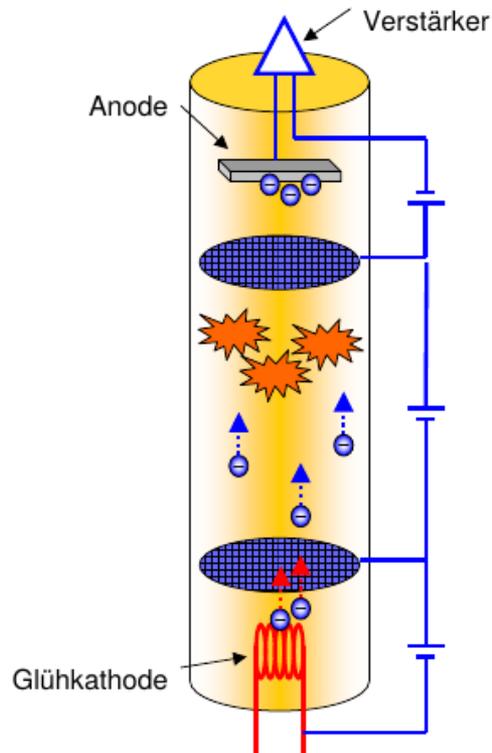
Im Spektrum der emittierten Röntgenstrahlung beobachtet man zusätzlich zu einem kontinuierlichen Anteil **scharfe Linien**



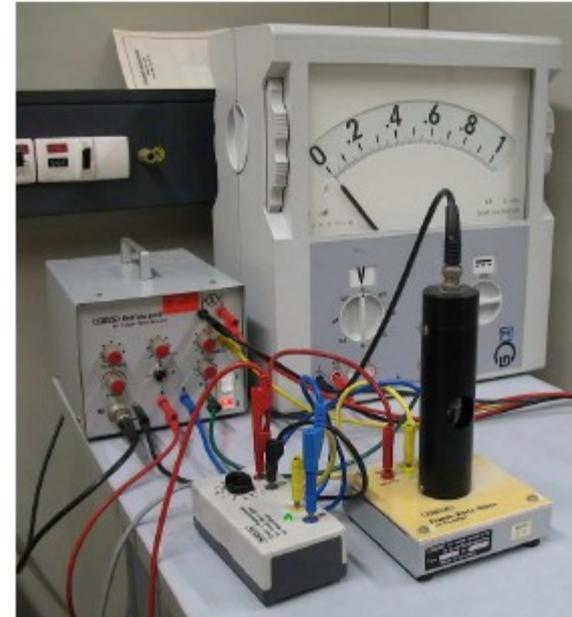
[ip.uni-goettingen.de]

- Linien abhängig von Anodenmaterial
- Klassische Physik: **keine Erklärung!**

Untersuchung der Strom-Spannungskennlinie von Röhren mit Gasfüllung.
Franck und Hertz verwendeten im Originalversuch Quecksilberdampf.



Schema einer Franck-Hertz-Röhre



Praktikumsaufbau

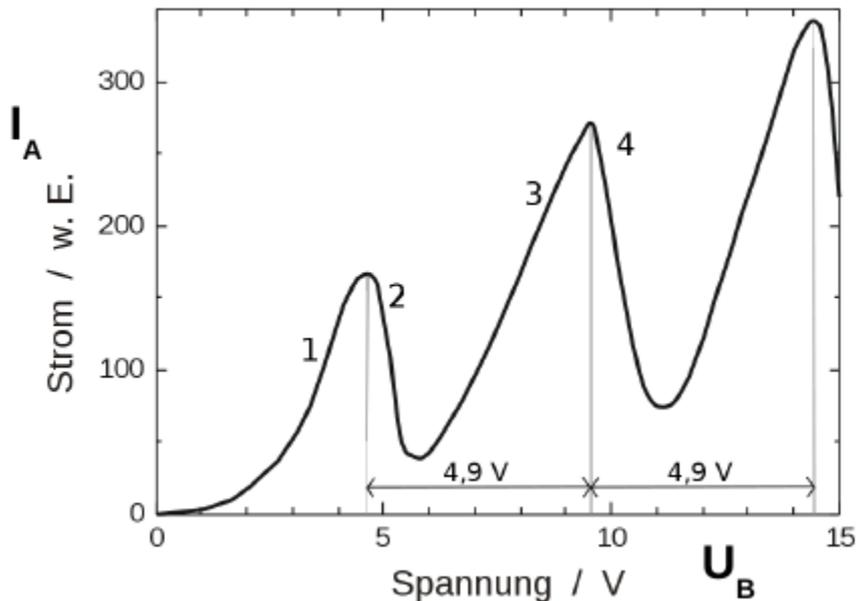


**Video: Franck-Hertz-
Versuch mit Neon**

[Link zum Video](#)

Durchführung:

- Elektronen werden aus Glühdraht (Kathode) emittiert
- und durch regelbare Spannung U zum Gitter beschleunigt.
- Auf der Beschleunigungsstrecke stoßen sie die Hg-Atome
- Nach Durchgang durch Gitter: Gegenfeldmethode
→ nur hinreichend energiereiche Elektronen tragen zum Anoden-Strom bei



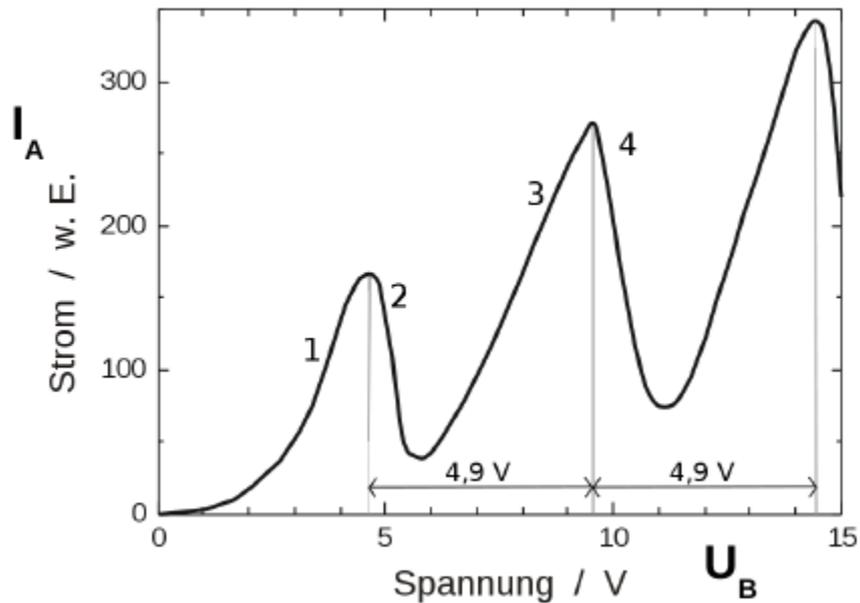
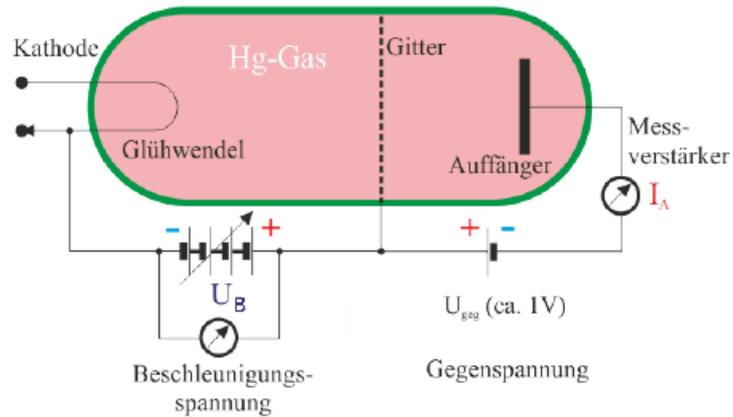
I / U – Kennlinie einer Franck-Hertz-Röhre mit Quecksilberdampf



James Franck

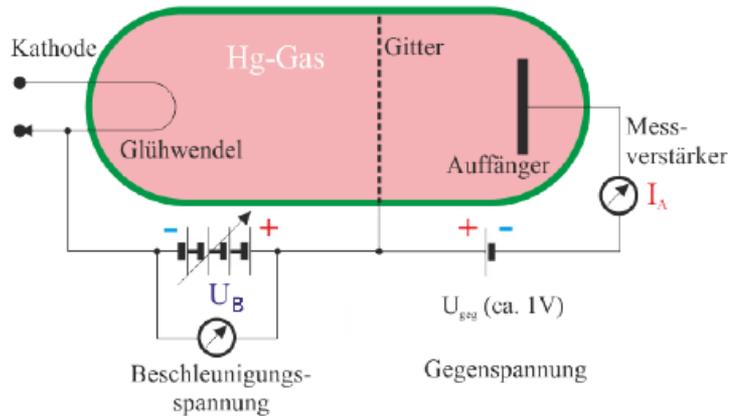


Gustav Hertz

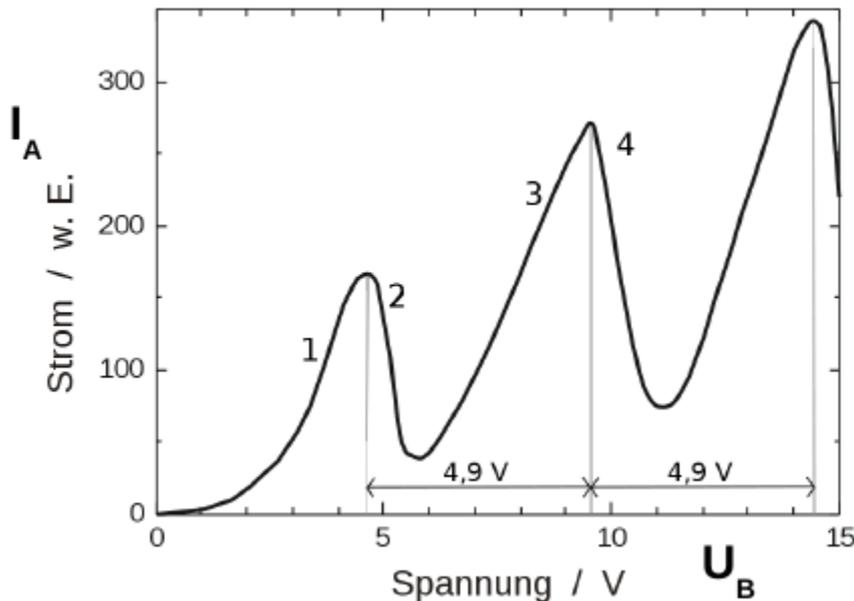


I / U – Kennlinie einer Franck-Hertz-Röhre mit Quecksilberdampf

Erklärung:

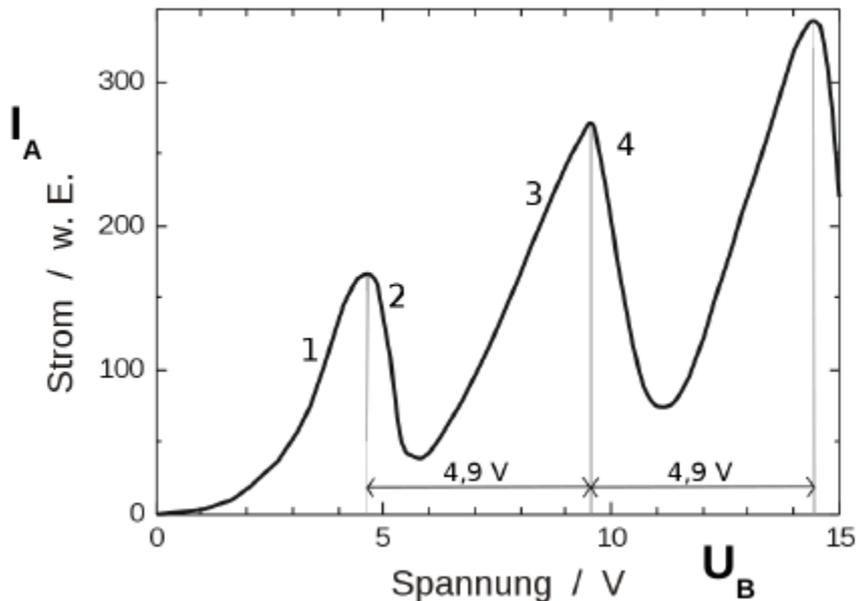
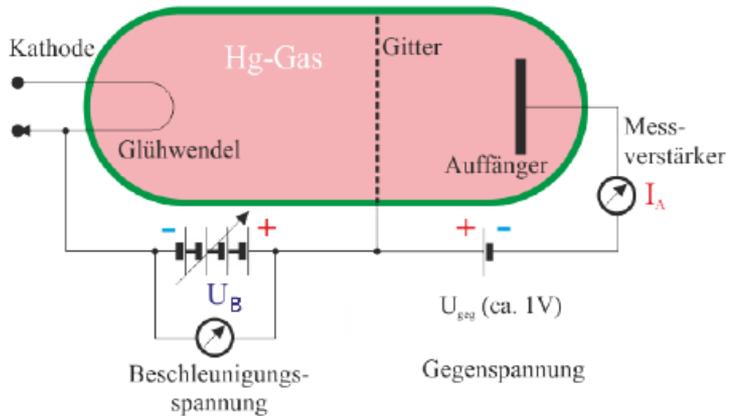


- Elektronen werden durch U_B beschleunigt, bei bestimmten kinetischen Energien (=Positionen im Gas) verlieren die Elektronen ihre kinetische Energie durch Anregung der Hg-Atome
- Abfall der Anodestromstärke entspricht kleiner werdender Anzahl von Elektronen, die zur Anode kommen → inelastische Stöße e-Hg ($m_e \ll m_{Hg}$!).
- Wiederanstieg der Anodenstromstärke durch erneute Beschleunigung



I / U – Kennlinie einer Franck-Hertz-Röhre mit Quecksilberdampf

Erklärung:



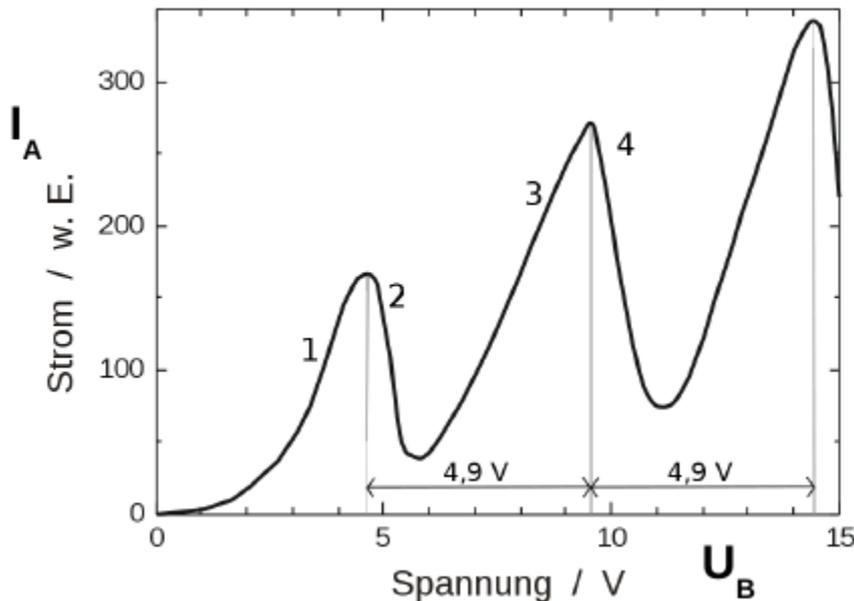
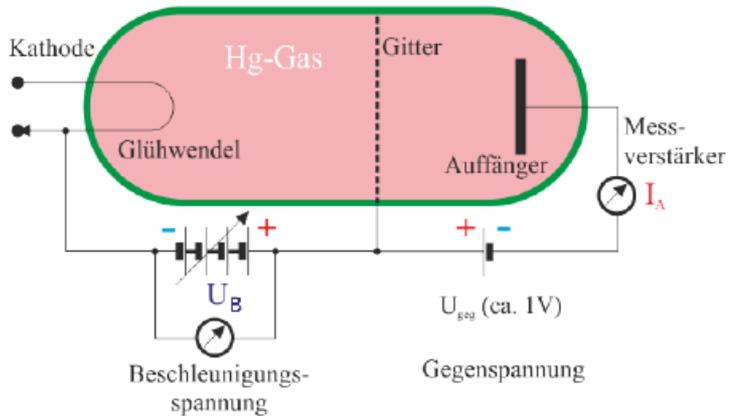
I / U – Kennlinie einer Franck-Hertz-Röhre mit Quecksilberdampf

- Elektronen werden durch U_B beschleunigt, bei bestimmten kinetischen Energien (=Positionen im Gas) verlieren die Elektronen ihre kinetische Energie durch Anregung der Hg-Atome
- Abfall der Anodestromstärke entspricht kleiner werdender Anzahl von Elektronen, die zur Anode kommen → inelastische Stöße e-Hg ($m_e \ll m_{Hg}$!).
- Wiederanstieg der Anodenstromstärke durch erneute Beschleunigung

Ergebnis:

Nachweis diskreter Anregungsenergien in Atomen durch Stoßanregung

Erklärung:



I / U – Kennlinie einer Franck-Hertz-Röhre mit Quecksilberdampf

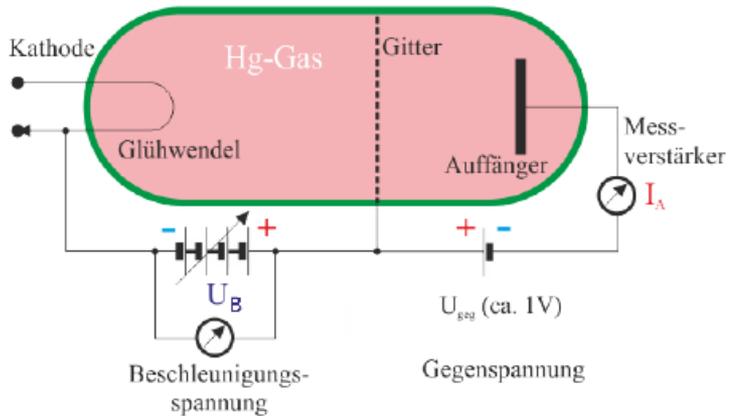
- Elektronen werden durch U_B beschleunigt, bei bestimmten kinetischen Energien (=Positionen im Gas) verlieren die Elektronen ihre kinetische Energie durch Anregung der Hg-Atome
- Abfall der Anodestromstärke entspricht kleiner werdender Anzahl von Elektronen, die zur Anode kommen → inelastische Stöße e-Hg ($m_e \ll m_{Hg}$!).
- Wiederanstieg der Anodenstromstärke durch erneute Beschleunigung

Ergebnis:

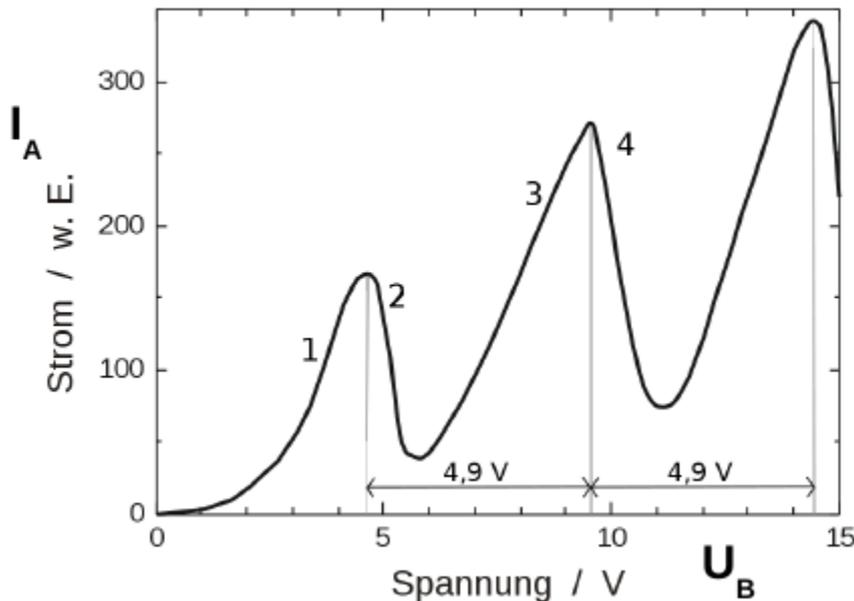
Nachweis diskreter Anregungsenergien in Atomen durch Stoßanregung

Nobelpreis 1925

Erklärung:



- Elektronen werden durch U_B beschleunigt, bei bestimmten kinetischen Energien (=Positionen im Gas) verlieren die Elektronen ihre kinetische Energie durch Anregung der Hg-Atome
- Abfall der Anodestromstärke entspricht kleiner werdender Anzahl von Elektronen, die zur Anode kommen → inelastische Stöße e-Hg ($m_e \ll m_{\text{Hg}}$!).
- Wiederanstieg der Anodenstromstärke durch erneute Beschleunigung



I / U – Kennlinie einer Franck-Hertz-Röhre mit Quecksilberdampf

Ergebnis:

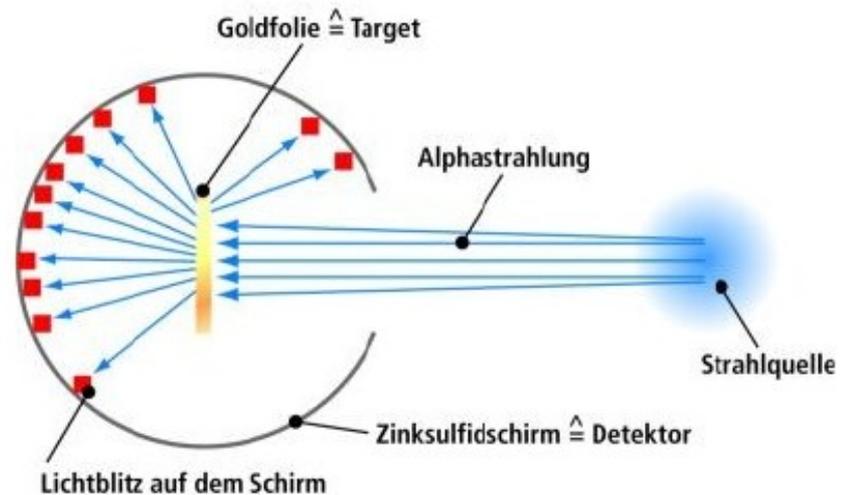
Nachweis diskreter Anregungsenergien in Atomen durch Stoßanregung

Nobelpreis 1925

Anm: Franck und Hertz gingen bei der Erstveröffentlichung davon aus die Ionisationsenergie von Hg bestimmt zu haben.

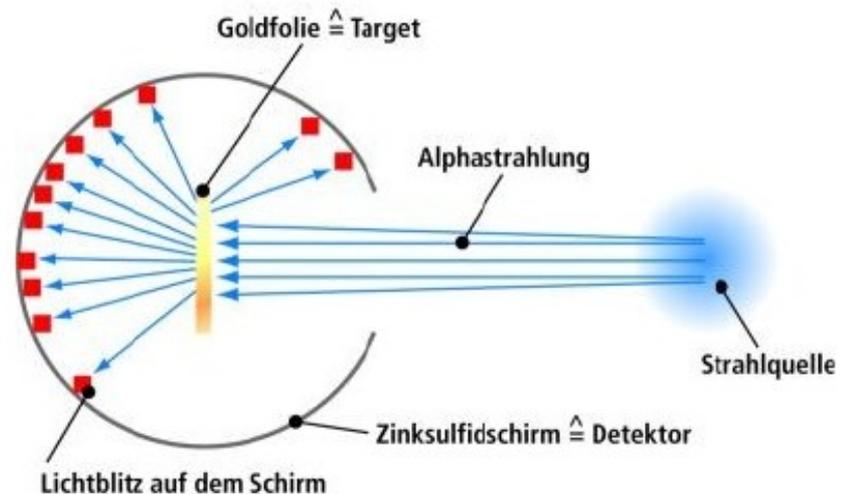
Ein ganz wesentlicher Beitrag zur Aufklärung der Struktur der Atome gelang Rutherford, Geiger und Marsden mit dem berühmten Streuexperiment.

Beschuss einer Goldfolie mit α -Teilchen und Messung der Streuwinkel

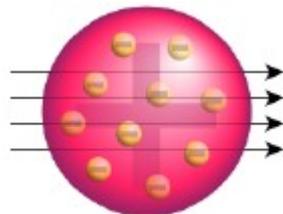


Ein ganz wesentlicher Beitrag zur Aufklärung der Struktur der Atome gelang Rutherford, Geiger und Marsden mit dem berühmten Streuexperiment.

Beschuss einer Goldfolie mit α -Teilchen und Messung der Streuwinkel



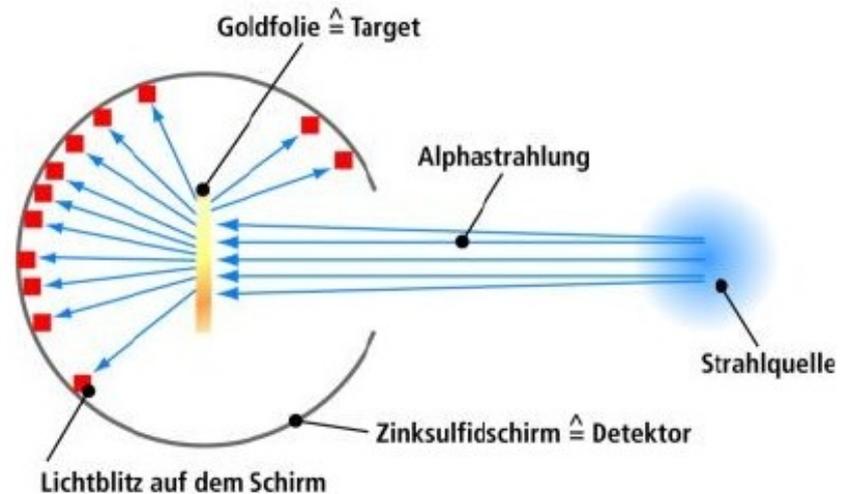
Erwartung für Atome mit homogener Massenverteilung (z.B. „Thomsons Rosinenkuchenmodell“):



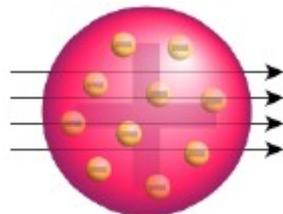
höchstens geringe Ablenkung der α -Teilchen vermutet.

Ein ganz wesentlicher Beitrag zur Aufklärung der Struktur der Atome gelang Rutherford, Geiger und Marsden mit dem berühmten Streuexperiment.

Beschuss einer Goldfolie mit α -Teilchen und Messung der Streuwinkel



Erwartung für Atome mit homogener Massenverteilung (z.B. „Thomsons Rosinenkuchenmodell“):



höchstens geringe Ablenkung der α -Teilchen vermutet.

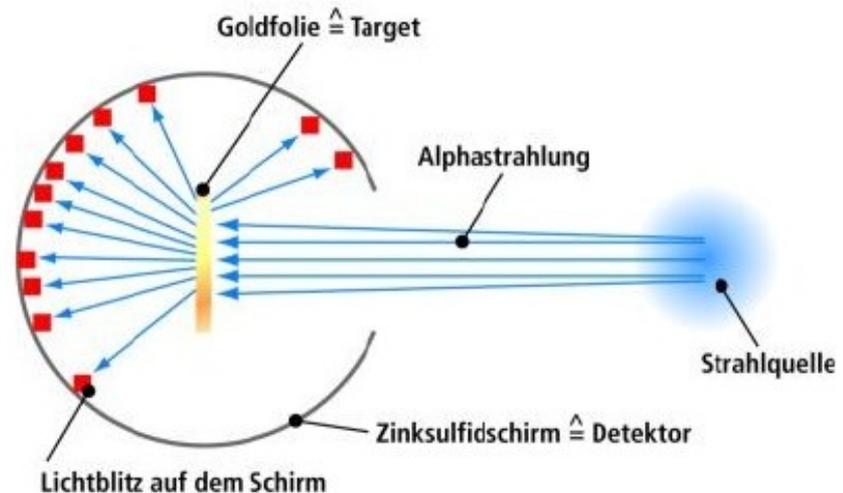


Video: Rutherford'scher Streuversuch

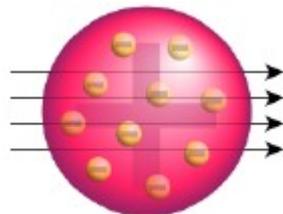
[Link zum Video](#)

Ein ganz wesentlicher Beitrag zur Aufklärung der Struktur der Atome gelang Rutherford, Geiger und Marsden mit dem berühmten Streuexperiment.

Beschuss einer Goldfolie mit α -Teilchen und Messung der Streuwinkel



Erwartung für Atome mit homogener Massenverteilung (z.B. „Thomsons Rosinenkuchenmodell“):



höchstens geringe Ablenkung der α -Teilchen vermutet.



Video: Rutherford'scher Streuversuch

[Link zum Video](#)

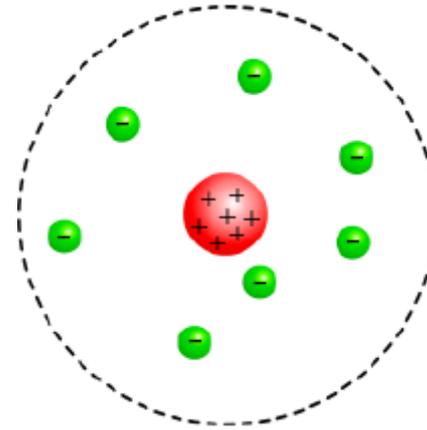
Ergebnis:

Es treten auch große Streuwinkel und sogar Rückstreuung auf !

Schlussfolgerung:

Rutherford'sches Atommodell (1911):

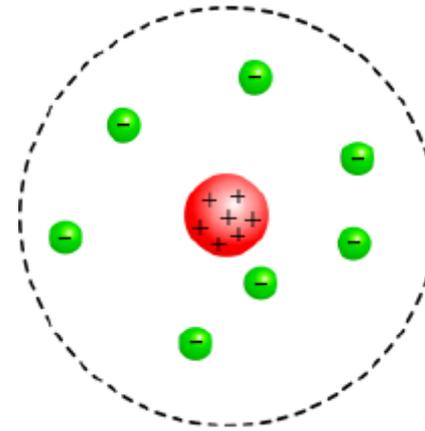
- Atom besteht aus sehr kleinem, **massivem Kern**
- und einer **Hülle**, die aus leichten, negativ geladenen Elektronen besteht



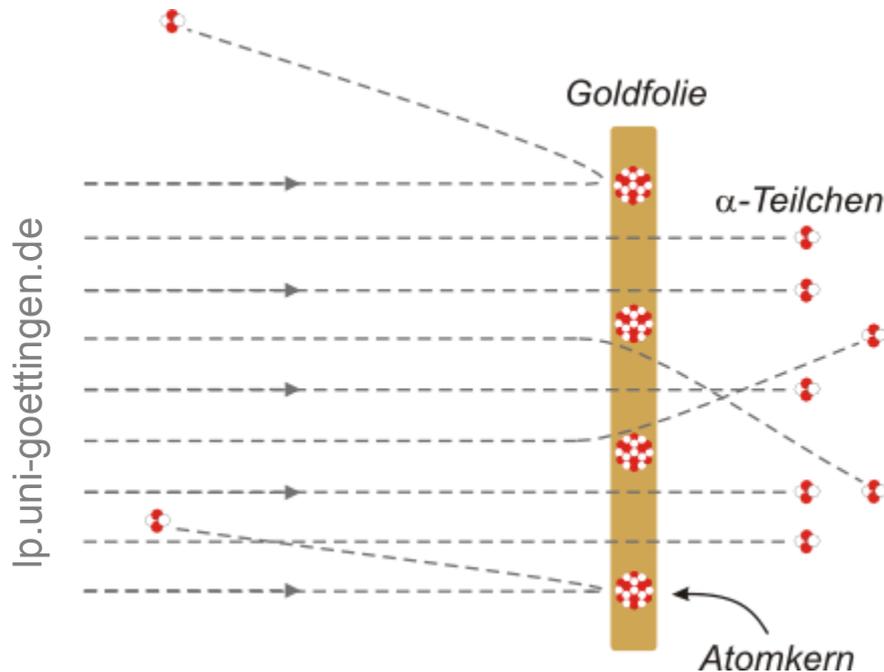
Schlussfolgerung:

Rutherford'sches Atommodell (1911):

- Atom besteht aus sehr kleinem, **massivem Kern**
- und einer **Hülle**, die aus leichten, negativ geladenen Elektronen besteht



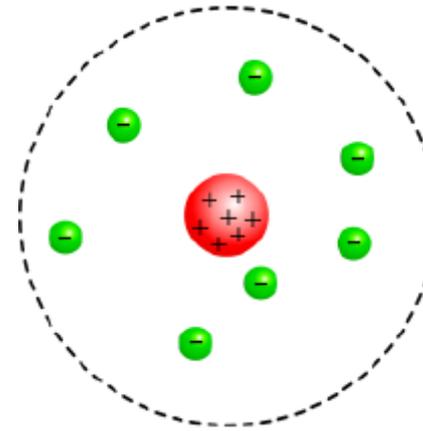
Erklärung der Verteilung der Streuwinkel:



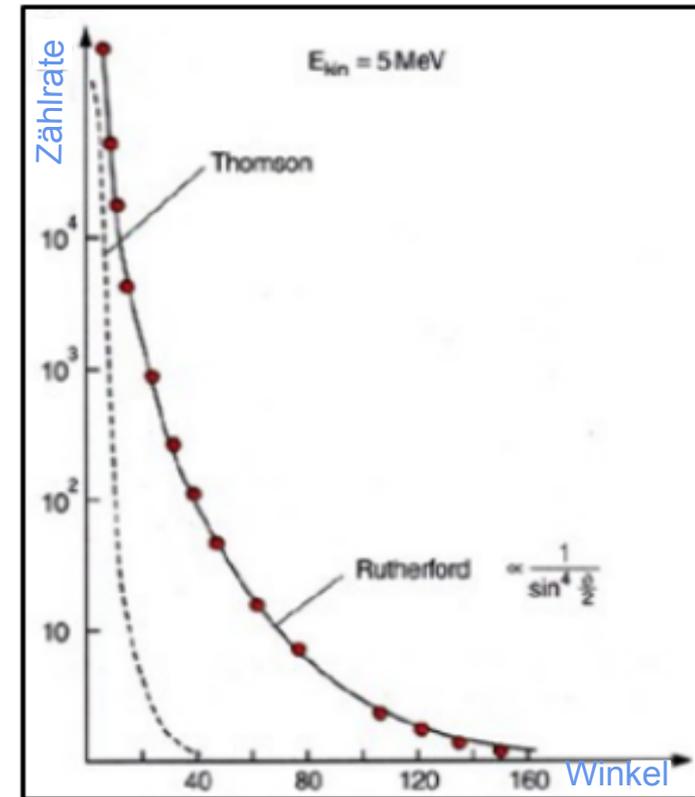
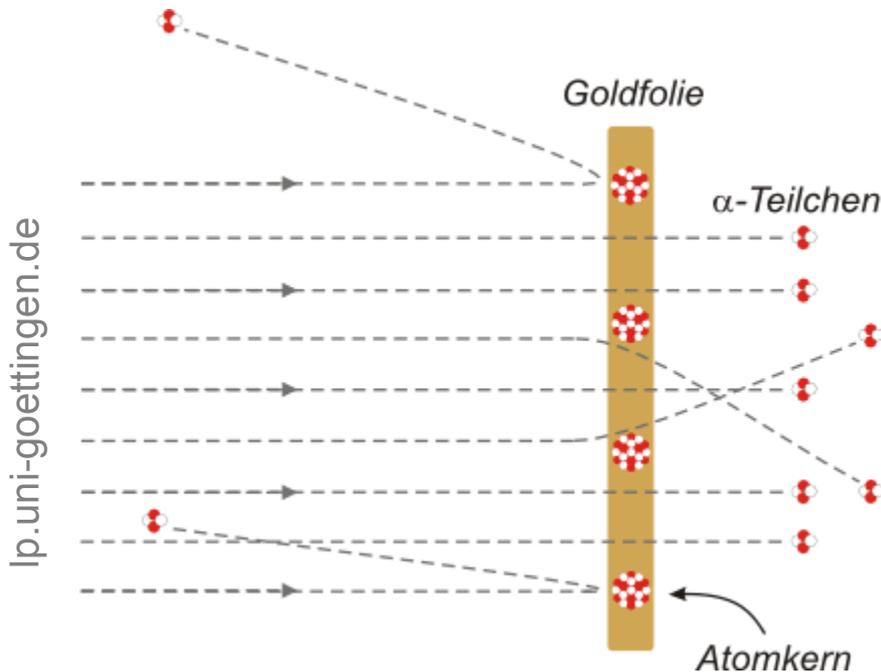
Schlussfolgerung:

Rutherford'sches Atommodell (1911):

- Atom besteht aus sehr kleinem, **massivem Kern**
- und einer **Hülle**, die aus leichten, negativ geladenen Elektronen besteht



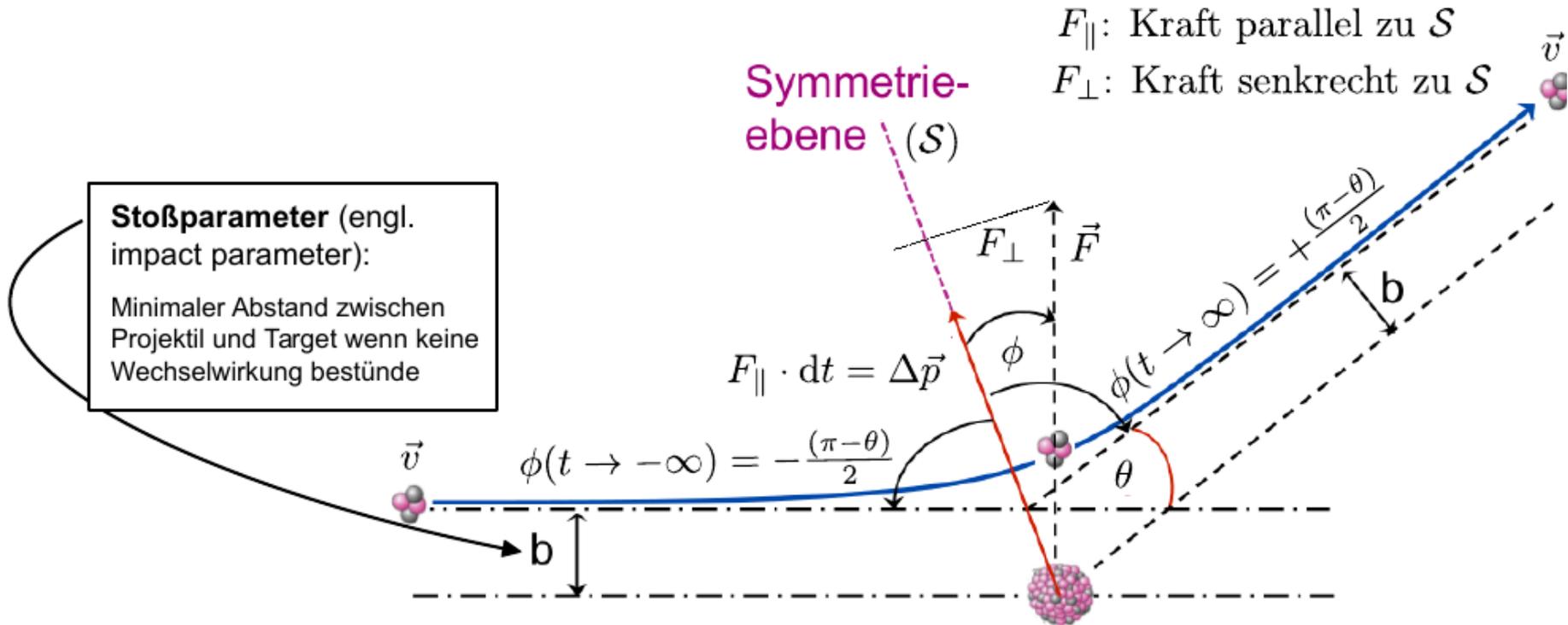
Erklärung der Verteilung der Streuwinkel:



Der Rutherford-Versuch: Herleitung

Annahme: Streuung am Coulomb-Potential eines punktförmigen Kerns

$$N(\Theta) = k \frac{1}{\sin^4\left(\frac{\Theta}{2}\right)}$$



Annahme: Streuung am Coulomb-Potential
eines punktförmigen Kerns

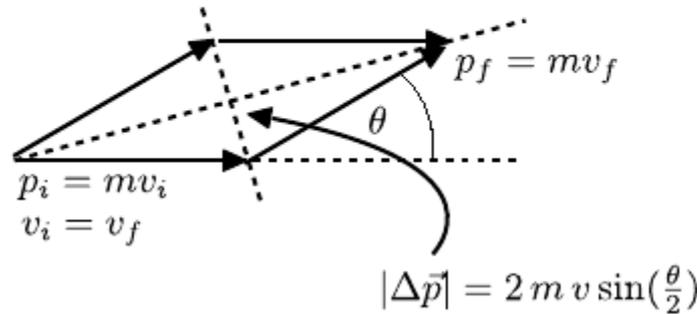
$$N(\Theta) = k \frac{1}{\sin^4\left(\frac{\Theta}{2}\right)}$$

Annahme: Streuung am Coulomb-Potential
eines punktförmigen Kerns

$$N(\Theta) = k \frac{1}{\sin^4\left(\frac{\Theta}{2}\right)}$$

- **Impulsänderung:**

$$|\Delta\vec{p}| = 2 m v \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (1)$$

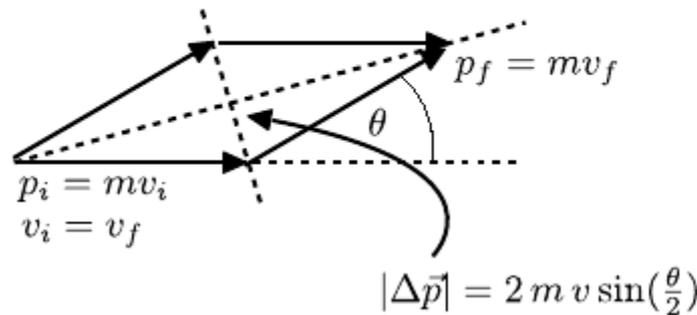


Annahme: Streuung am Coulomb-Potential eines punktförmigen Kerns

$$N(\Theta) = k \frac{1}{\sin^4\left(\frac{\Theta}{2}\right)}$$

- **Impulsänderung:**

$$|\Delta\vec{p}| = 2 m v \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (1)$$



- Impulsänderung durch **Kraftwirkung:**

$$|\Delta\vec{p}| = \int_{-\infty}^{\infty} F_{\parallel} \cdot dt = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{z Z e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \cos\phi(t) \cdot dt$$

$(r(t), \Phi(t))$ ist aktueller Ort in Polarkoordinaten

- Variablensubstitution $dt \rightarrow d\phi$
(\rightarrow Drehimpulserhaltung):

$$\begin{aligned} |\vec{L}| &= |\vec{r} \times \vec{p}| = m v b \\ &= m \omega r^2 = m \frac{d\phi}{dt} r^2 \end{aligned}$$

$$(\phi \in [-(\pi - \theta)/2; +(\pi - \theta)/2])$$

- **Gleichsetzen von (1) und (2):**

$$\tan\left(\frac{\theta}{2}\right) = \frac{z Z e^2}{4\pi\epsilon_0 m v^2 b} \equiv \frac{k}{b}$$

$$b(\theta) = \frac{k}{\tan\left(\frac{\theta}{2}\right)}$$

Relation

Streuwinkel - Stoßparameter

- Variablensubstitution $dt \rightarrow d\phi$
(\rightarrow Drehimpulserhaltung):

$$\begin{aligned} |\vec{L}| &= |\vec{r} \times \vec{p}| = m v b \\ &= m \omega r^2 = m \frac{d\phi}{dt} r^2 \end{aligned}$$

$$(\phi \in [-(\pi - \theta)/2; +(\pi - \theta)/2])$$

$$\begin{aligned} |\Delta \vec{p}| &= \int_{-(\pi - \theta)/2}^{(\pi - \theta)/2} \frac{z Z e^2}{4\pi\epsilon_0 v b} \cos \phi \cdot d\phi = \frac{z Z e^2}{4\pi\epsilon_0 v b} [\sin \phi]_{-(\pi - \theta)/2}^{(\pi - \theta)/2} \\ &= \frac{z Z e^2}{4\pi\epsilon_0 v b} 2 \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (2) \end{aligned}$$

- Gleichsetzen von (1) und (2):

$$\tan\left(\frac{\theta}{2}\right) = \frac{z Z e^2}{4\pi\epsilon_0 m v^2 b} \equiv \frac{k}{b}$$

$$b(\theta) = \frac{k}{\tan\left(\frac{\theta}{2}\right)}$$

Relation

Streuwinkel - Stoßparameter

Zwischenstand:

Der **Stoßparameter** b bestimmt den Verlauf der Bahn-Hyperbel im Zentralpotential des Kerns. Der Streuwinkel θ hängt von nur von b (und einigen Konstanten) ab.

Da wir den genauen Wert von b für jedes einzelne einlaufende Teilchen nicht kennen, wählen wir eine statistische Herangehensweise:

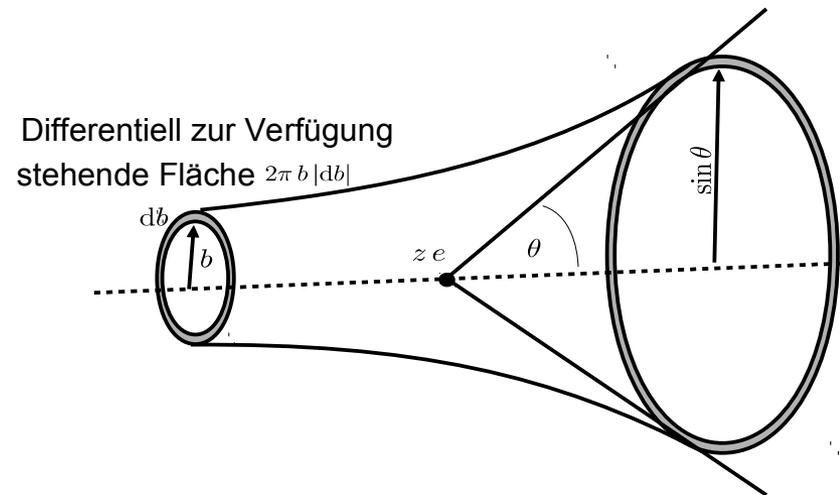
- die einlaufenden Teilchen bilden einen homogenen, konstanten Fluss mit mit konstanter Stromdichte j , $[j] = \frac{1}{\text{m}^2 \text{s}}$

Zwischenstand:

Der **Stoßparameter** b bestimmt den Verlauf der Bahn-Hyperbel im Zentralpotential des Kerns. Der Streuwinkel θ hängt von nur von b (und einigen Konstanten) ab.

Da wir den genauen Wert von b für jedes einzelne einlaufende Teilchen nicht kennen, wählen wir eine statistische Herangehensweise:

- die einlaufenden Teilchen bilden einen homogenen, konstanten Fluss mit mit konstanter Stromdichte j , $[j] = \frac{1}{\text{m}^2 \text{s}}$

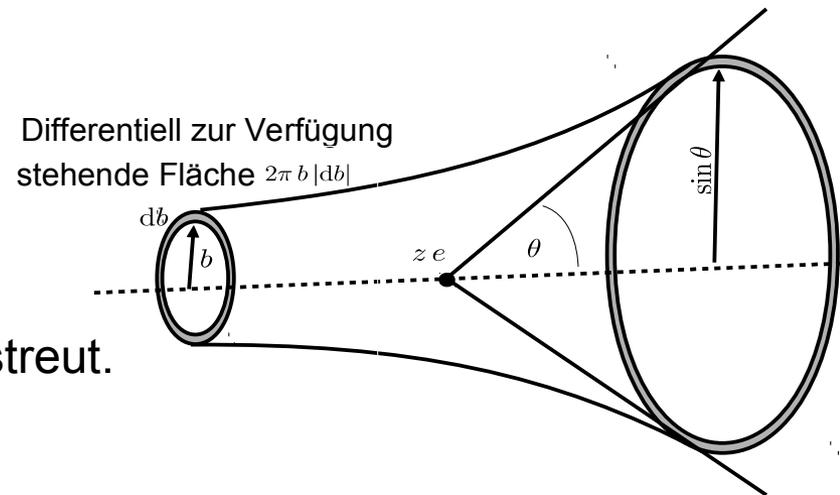


Zwischenstand:

Der **Stoßparameter** b bestimmt den Verlauf der Bahn-Hyperbel im Zentralpotential des Kerns. Der Streuwinkel θ hängt von nur von b (und einigen Konstanten) ab.

Da wir den genauen Wert von b für jedes einzelne einlaufende Teilchen nicht kennen, wählen wir eine statistische Herangehensweise:

- die einlaufenden Teilchen bilden einen homogenen, konstanten Fluss mit mit konstanter Stromdichte j , $[j] = \frac{1}{\text{m}^2 \text{s}}$
- alle Teilchen die in den Ring $d\sigma = 2\pi b db$ treffen, werden in den Winkelbereich $d\theta$, also den Raumwinkelbereich $d\Omega = 2\pi \sin\theta d\theta$ gestreut.

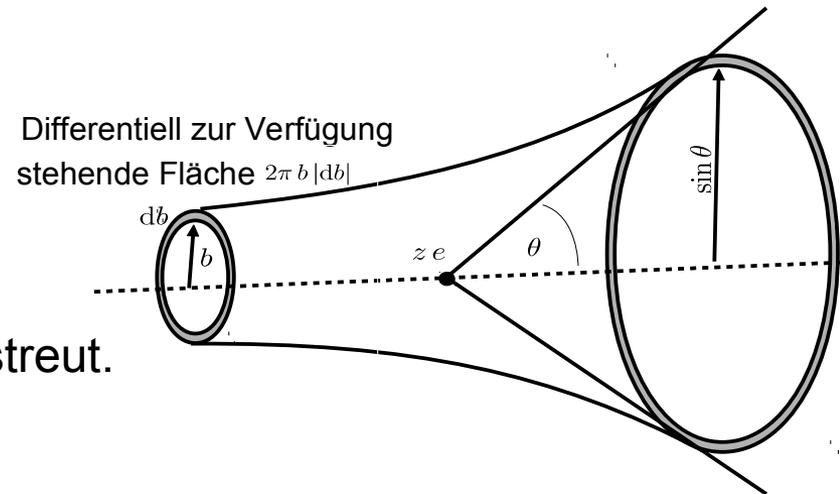


Zwischenstand:

Der **Stoßparameter** b bestimmt den Verlauf der Bahn-Hyperbel im Zentralpotential des Kerns. Der Streuwinkel θ hängt von nur von b (und einigen Konstanten) ab.

Da wir den genauen Wert von b für jedes einzelne einlaufende Teilchen nicht kennen, wählen wir eine statistische Herangehensweise:

- die einlaufenden Teilchen bilden einen homogenen, konstanten Fluss mit mit konstanter Stromdichte j , $[j] = \frac{1}{\text{m}^2 \text{s}}$
- alle Teilchen die in den Ring $d\sigma = 2\pi b db$ treffen, werden in den Winkelbereich $d\theta$, also den Raumwinkelbereich $d\Omega = 2\pi \sin\theta d\theta$ gestreut.



σ nennt man den
Wirkungsquerschnitt:

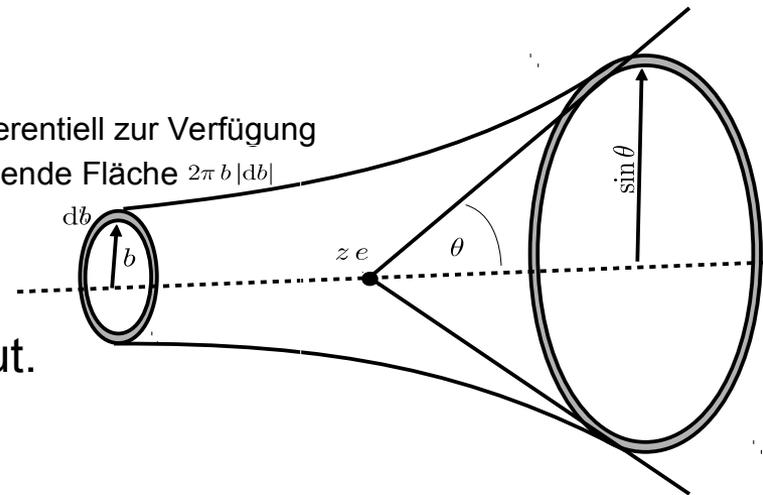
Zwischenstand:

Der **Stoßparameter** b bestimmt den Verlauf der Bahn-Hyperbel im Zentralpotential des Kerns. Der Streuwinkel θ hängt von nur von b (und einigen Konstanten) ab.

Da wir den genauen Wert von b für jedes einzelne einlaufende Teilchen nicht kennen, wählen wir eine statistische Herangehensweise:

- die einlaufenden Teilchen bilden einen homogenen, konstanten Fluss mit mit konstanter Stromdichte j , $[j] = \frac{1}{\text{m}^2 \text{s}}$
- alle Teilchen die in den Ring $d\sigma = 2\pi b db$ treffen, werden in den Winkelbereich $d\theta$, also den Raumwinkelbereich $d\Omega = 2\pi \sin\theta d\theta$ gestreut.

Differentiell zur Verfügung stehende Fläche $2\pi b |db|$



σ nennt man den

Wirkungsquerschnitt:

$$\sigma = \frac{\text{Rate der gestreuten Teilchen}}{\text{Fluss} \cdot \text{Anzahl der Streuzentren}}, \quad [\sigma] = \text{m}^2 \text{ (Fläche)}$$

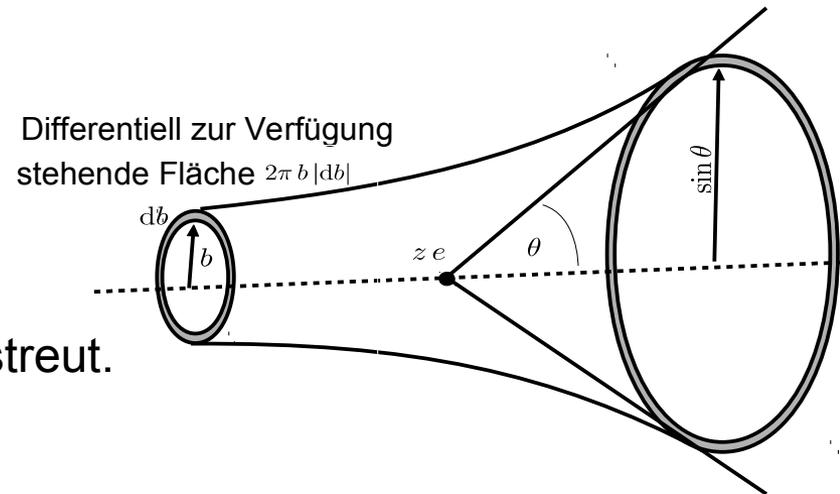
Zwischenstand:

Der **Stoßparameter** b bestimmt den Verlauf der Bahn-Hyperbel im Zentralpotential des Kerns. Der Streuwinkel θ hängt von nur von b (und einigen Konstanten) ab.

Da wir den genauen Wert von b für jedes einzelne einlaufende Teilchen nicht kennen, wählen wir eine statistische Herangehensweise:

- die einlaufenden Teilchen bilden einen homogenen, konstanten Fluss mit mit konstanter Stromdichte j , $[j] = \frac{1}{\text{m}^2 \text{s}}$

- alle Teilchen die in den Ring $d\sigma = 2\pi b db$ treffen, werden in den Winkelbereich $d\theta$, also den Raumwinkelbereich $d\Omega = 2\pi \sin\theta d\theta$ gestreut.



σ nennt man den

Wirkungsquerschnitt:

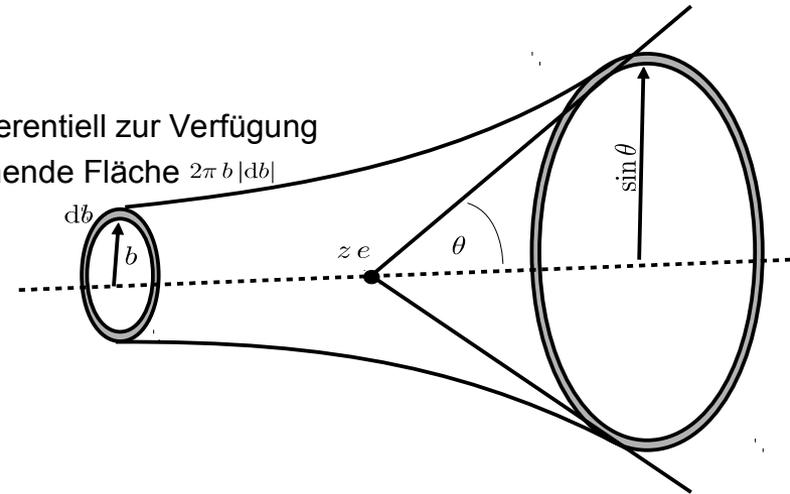
$$\sigma = \frac{\text{Rate der gestreuten Teilchen}}{\text{Fluss} \cdot \text{Anzahl der Streuzentren}}, \quad [\sigma] = \text{m}^2 \text{ (Fläche)}$$

Der Wirkungsquerschnitt ist eine Eigenschaft des Einzelprozesses, gibt also die Streuwahrscheinlichkeit pro einlaufendem Teilchen und Streuzentrum an !

- Geometrischer Wirkungsquerschnitt:

$$\left. \begin{aligned} d\sigma &= 2\pi b |db| \\ d\Omega &= 2\pi \sin \theta d\theta \end{aligned} \right\} \frac{d\sigma}{d\Omega} = -\frac{b}{\sin \theta} \frac{db}{d\theta}$$

Differentiell zur Verfügung
stehende Fläche $2\pi b |db|$



- Geometrischer Wirkungsquerschnitt:

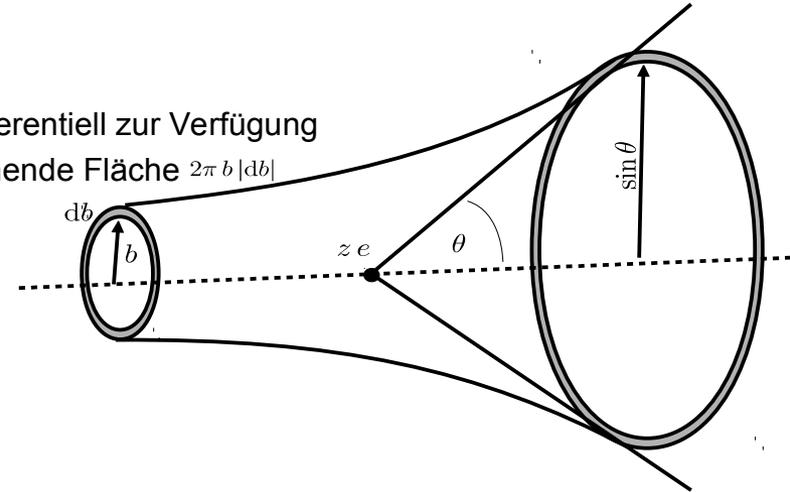
$$\left. \begin{aligned} d\sigma &= 2\pi b |db| \\ d\Omega &= 2\pi \sin \theta d\theta \end{aligned} \right\} \frac{d\sigma}{d\Omega} = -\frac{b}{\sin \theta} \frac{db}{d\theta}$$

- Anwendung auf Rutherfordstreuung:

$$b(\theta) = \frac{k}{\tan(\frac{\theta}{2})} \quad \frac{db}{d\theta} = -\frac{k}{2 \sin^2(\frac{\theta}{2})}$$

$$\begin{aligned} \frac{d\sigma}{d\Omega} &= -\frac{b}{\sin \theta} \left(-\frac{k}{2 \sin^2(\frac{\theta}{2})} \right) \\ &= -\frac{k}{\tan(\frac{\theta}{2}) \sin \theta} \left(-\frac{k}{2 \sin^2(\frac{\theta}{2})} \right) = \frac{k^2}{4 \sin^4(\frac{\theta}{2})} \end{aligned}$$

Differentiell zur Verfügung stehende Fläche $2\pi b |db|$



mit

$$\tan(\Theta/2) = \frac{\sin \Theta/2}{\cos \Theta/2}$$

$$\sin \Theta = 2 \sin \Theta/2 \cos \Theta/2$$

- Geometrischer Wirkungsquerschnitt:

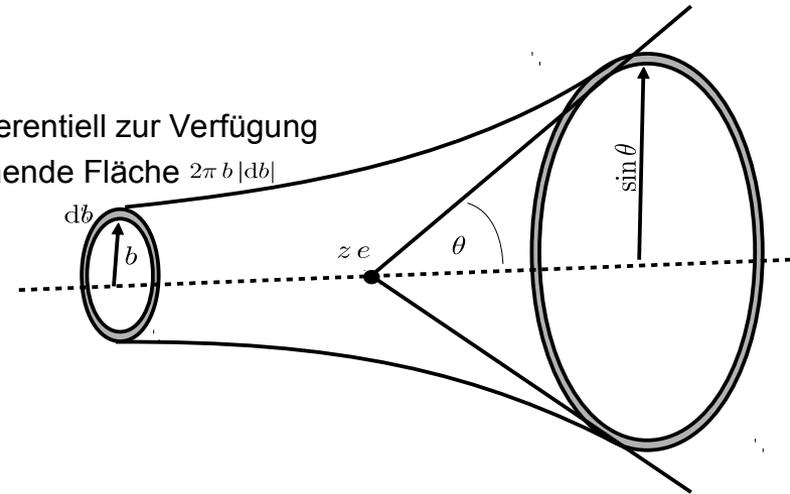
$$\left. \begin{aligned} d\sigma &= 2\pi b |db| \\ d\Omega &= 2\pi \sin \theta d\theta \end{aligned} \right\} \frac{d\sigma}{d\Omega} = -\frac{b}{\sin \theta} \frac{db}{d\theta}$$

- Anwendung auf Rutherfordstreuung:

$$b(\theta) = \frac{k}{\tan(\frac{\theta}{2})} \quad \frac{db}{d\theta} = -\frac{k}{2 \sin^2(\frac{\theta}{2})}$$

$$\begin{aligned} \frac{d\sigma}{d\Omega} &= -\frac{b}{\sin \theta} \left(-\frac{k}{2 \sin^2(\frac{\theta}{2})} \right) \\ &= -\frac{k}{\tan(\frac{\theta}{2}) \sin \theta} \left(-\frac{k}{2 \sin^2(\frac{\theta}{2})} \right) = \frac{k^2}{4 \sin^4(\frac{\theta}{2})} \end{aligned}$$

Differenziell zur Verfügung stehende Fläche $2\pi b |db|$



mit

$$\begin{aligned} \tan(\Theta/2) &= \frac{\sin \Theta/2}{\cos \Theta/2} \\ \sin \Theta &= 2 \sin \Theta/2 \cos \Theta/2 \end{aligned}$$

Mit Hilfe des Wirkungsquerschnitts berechnet man Anzahl der pro Zeiteinheit in einen Raumwinkelbereich $\Delta\Omega$ gestreuten Teilchen, die Rate $R(\Delta\Omega)$:

$$R(\Delta\Omega) = \frac{d\sigma}{d\Omega} \Delta\Omega \cdot j \cdot N_s$$

j : Stromdichte der einlaufenden Teilchen
 N_s : Zahl der Streuzentren im Strahl

Ein typische Anwendung des Wirkungsquerschnitts:

1. Eine Quelle liefert $100'000$ α -Teilchen / s (= 100 kBq) bei einem einem Strahlquerschnitt von 1mm^2 . Wie groß ist der Teilchenstrom j ?
2. Der Strahl trifft auf eine dünne Goldfolie (Masse $\mu = 200 \text{ }\mu\text{g}/\text{cm}^2$, Dichte $\rho = 19,3 \text{ g}/\text{cm}^3$, Molmasse $M = 197 \text{ g}/\text{mol}$).
Wie viele Goldatome N_{Au} befinden sich im Strahl ?
3. Die gestreuten Teilchen werden mit einem Detektor mit einer Querschnittsfläche von 1mm^2 in 20 cm Abstand von der Goldfolie gemessen.
Welchen Raumwinkelbereich $\Delta\Omega$ deckt der Detektor ab ?
4. Der Rutherford-Wirkungsquerschnitt für Streuung unter einem Winkel

von $\theta=10^\circ$ beträgt
$$\frac{d\sigma}{d\Omega}(10^\circ) = 2.0 \times 10^{-20} \frac{\text{cm}^2}{\text{sr}}$$

Frage: Welche Teilchenrate weist der Detektor nach ?

Ein typische Anwendung des Wirkungsquerschnitts:

1. Eine Quelle liefert $100'000 \alpha$ -Teilchen / s (= 100 kBq) bei einem einem Strahlquerschnitt von 1mm^2 . **Wie groß ist der Teilchenstrom j ?**
2. Der Strahl trifft auf eine dünne Goldfolie (Masse $\mu = 200 \mu\text{g}/\text{cm}^2$, Dichte $\rho = 19,3 \text{ g}/\text{cm}^3$, Molmasse $M = 197 \text{ g}/\text{mol}$).
Wie viele Goldatome N_{Au} befinden sich im Strahl ?
3. Die gestreuten Teilchen werden mit einem Detektor mit einer Querschnittsfläche von 1mm^2 in 20 cm Abstand von der Goldfolie gemessen.
Welchen Raumwinkelbereich $\Delta\Omega$ deckt der Detektor ab ?
4. Der Rutherford-Wirkungsquerschnitt für Streuung unter einem Winkel

von $\theta=10^\circ$ beträgt $\frac{d\sigma}{d\Omega}(10^\circ) = 2.0 \times 10^{-20} \frac{\text{cm}^2}{\text{sr}}$

Frage: Welche Teilchenrate weist der Detektor nach ?

Einsetzen in die Formel $N(\Delta\Omega) = \frac{d\sigma}{d\Omega} \Delta\Omega \cdot j \cdot N_{\text{Au}}$ liefert die Antwort.

Wir fassen unsere bisherige Kenntnis zusammen:

Wir fassen unsere bisherige Kenntnis zusammen:

- Atome bestehen aus einem schweren, sehr kleinen positiv geladenen Kern, der fast die gesamte Masse eines Atoms ausmacht, und einer ihn umgebenden Hülle aus leichten Elektronen

Wir fassen unsere bisherige Kenntnis zusammen:

- Atome bestehen aus einem schweren, sehr kleinen positiv geladenen Kern, der fast die gesamte Masse eines Atoms ausmacht, und einer ihn umgebenden Hülle aus leichten Elektronen
- Atome emittieren Photonen des sichtbaren Lichts und Röntgenphotonen mit festen Energien.

Wir fassen unsere bisherige Kenntnis zusammen:

- Atome bestehen aus einem schweren, sehr kleinen positiv geladenen Kern, der fast die gesamte Masse eines Atoms ausmacht, und einer ihn umgebenden Hülle aus leichten Elektronen
- Atome emittieren Photonen des sichtbaren Lichts und Röntgenphotonen mit festen Energien.
- Atome absorbieren feste Energien, werden angeregt und emittieren Photonen mit festen Energien.

Wir fassen unsere bisherige Kenntnis zusammen:

- Atome bestehen aus einem schweren, sehr kleinen positiv geladenen Kern, der fast die gesamte Masse eines Atoms ausmacht, und einer ihn umgebenden Hülle aus leichten Elektronen
- Atome emittieren Photonen des sichtbaren Lichts und Röntgenphotonen mit festen Energien.
- Atome absorbieren feste Energien, werden angeregt und emittieren Photonen mit festen Energien.

Mögliche Erklärung:

in Atomen könnte es diskrete Energieniveaus geben – Anregung und Energieabgabe nur in festen Größen, die den Differenzen der Energiewerte der Niveaus entsprechen.

Wir fassen unsere bisherige Kenntnis zusammen:

- Atome bestehen aus einem schweren, sehr kleinen positiv geladenen Kern, der fast die gesamte Masse eines Atoms ausmacht, und einer ihn umgebenden Hülle aus leichten Elektronen
- Atome emittieren Photonen des sichtbaren Lichts und Röntgenphotonen mit festen Energien.
- Atome absorbieren feste Energien, werden angeregt und emittieren Photonen mit festen Energien.

Mögliche Erklärung:

in Atomen könnte es diskrete Energieniveaus geben – Anregung und Energieabgabe nur in festen Größen, die den Differenzen der Energiewerte der Niveaus entsprechen.

Die klassische Physik zu Beschreibung eines gebundenen Zustands von negativen Elektronen und einem positiven Kern liefert keine Erklärung !

Als erster versuchte Niels Bohr das Puzzle zusammen zu setzen:

Rutherford mit Auswahlregeln:



Niels Bohr

Als erster versuchte Niels Bohr das Puzzle zusammen zu setzen:

Rutherford mit Auswahlregeln:

Die Bohr'schen Postulate:

- 1) Es gibt **diskrete, stationäre Bahnen**, auf denen Elektronen strahlungslos umlaufen.
- 2) (**Frequenzbedingung**) Beim Übergang zwischen zwei stationären Zuständen (Bahnen) wird die Energiedifferenz in Form von Photonen aufgenommen / abgegeben: $E = h\nu = E_n - E_m$
- 3) (**Quantenbedingung**) der Bahndrehimpuls $|\vec{L}| = |\vec{r} \times \vec{p}|$ nimmt nur Vielfache von

$$\hbar = \frac{h}{2\pi} \quad \text{an:} \quad |\vec{L}| = |\vec{r} \times \vec{p}| = n\hbar = \frac{nh}{2\pi}, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$



Niels Bohr

Als erster versuchte Niels Bohr das Puzzle zusammen zu setzen:

Rutherford mit Auswahlregeln:

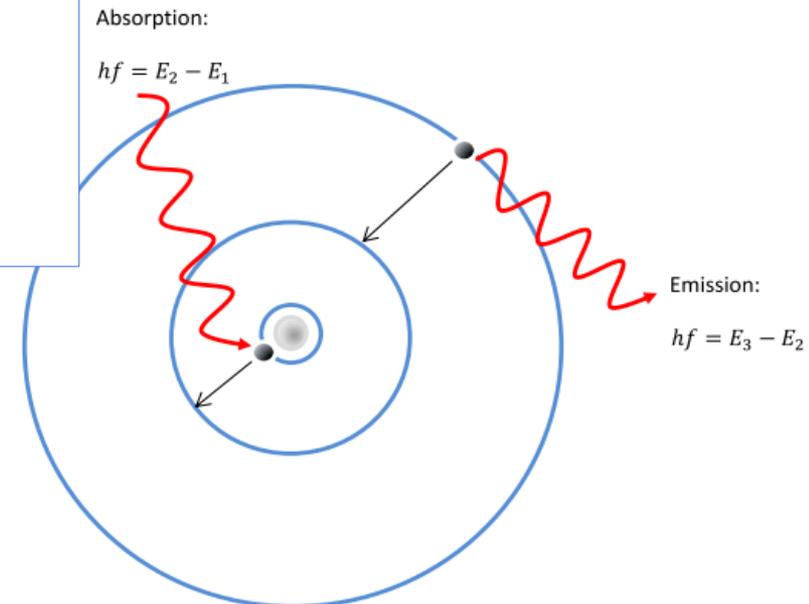
Die Bohr'schen Postulate:

- 1) Es gibt **diskrete, stationäre Bahnen**, auf denen Elektronen strahlungslos umlaufen.
- 2) (**Frequenzbedingung**) Beim Übergang zwischen zwei stationären Zuständen (Bahnen) wird die Energiedifferenz in Form von Photonen aufgenommen / abgegeben: $E = h\nu = E_n - E_m$
- 3) (**Quantenbedingung**) der Bahndrehimpuls $|\vec{L}| = |\vec{r} \times \vec{p}|$ nimmt nur Vielfache von

$$\hbar = \frac{h}{2\pi} \quad \text{an: } |\vec{L}| = |\vec{r} \times \vec{p}| = n\hbar = \frac{nh}{2\pi}, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$



Niels Bohr



Als erster versuchte Niels Bohr das Puzzle zusammen zu setzen:

Rutherford mit Auswahlregeln:

Die Bohr'schen Postulate:

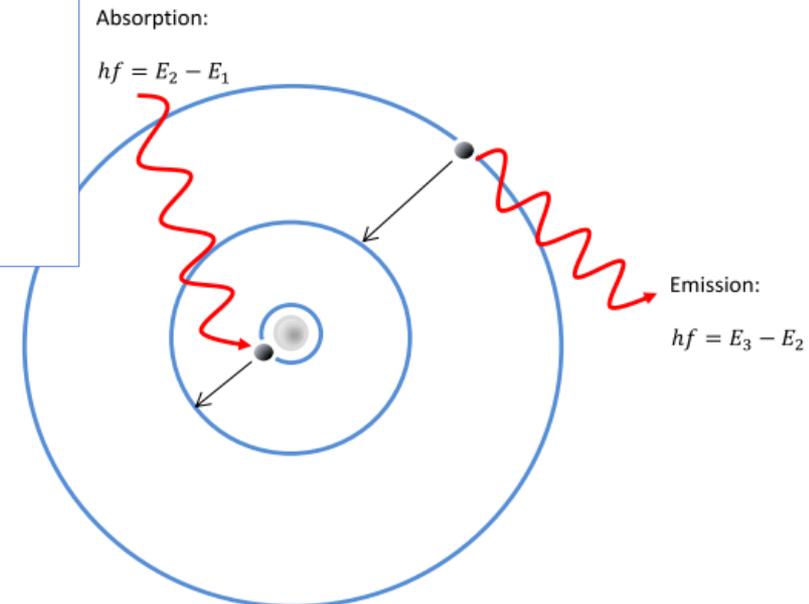
- 1) Es gibt **diskrete, stationäre Bahnen**, auf denen Elektronen strahlungslos umlaufen.
- 2) (**Frequenzbedingung**) Beim Übergang zwischen zwei stationären Zuständen (Bahnen) wird die Energiedifferenz in Form von Photonen aufgenommen / abgegeben: $E = h\nu = E_n - E_m$
- 3) (**Quantenbedingung**) der Bahndrehimpuls $|\vec{L}| = |\vec{r} \times \vec{p}|$ nimmt nur Vielfache von

$$\hbar = \frac{h}{2\pi} \quad \text{an:} \quad |\vec{L}| = |\vec{r} \times \vec{p}| = n\hbar = \frac{nh}{2\pi}, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

Mit diesen Postulaten ließen sich zwar viele experimentelle Ergebnisse beschreiben, sie liefern aber keine Erklärung der physikalischen Grundlagen !



Niels Bohr



Materiewellen

Wenn Licht als (klassische) „Welle“ Teilcheneigenschaften besitzt, dann könnten doch „Teilchen“ auch Welleneigenschaften besitzen ?

Materiewellen

Wenn Licht als (klassische) „Welle“ Teilcheneigenschaften besitzt, dann könnten doch „Teilchen“ auch Welleneigenschaften besitzen ?

Postulat von de Broglie (in seiner Dissertation):

jedes bewegte Teilchen oder Objekt hat eine zugeordnete Welle

mit der Wellenlänge $\lambda = \frac{h}{|\vec{p}|}$

Materiewellen

Wenn Licht als (klassische) „Welle“ Teilcheneigenschaften besitzt, dann könnten doch „Teilchen“ auch Welleneigenschaften besitzen ?

Postulat von de Broglie (in seiner Dissertation):

jedes bewegte Teilchen oder Objekt hat eine zugeordnete Welle

$$\text{mit der Wellenlänge } \lambda = \frac{h}{|\vec{p}|}$$

Anm: die Dissertation wurde zunächst abgelehnt, erst mit Einstein als zweitem Gutachter angenommen.

Materiewellen

Wenn Licht als (klassische) „Welle“ Teilcheneigenschaften besitzt, dann könnten doch „Teilchen“ auch Welleneigenschaften besitzen ?

Postulat von de Broglie (in seiner Dissertation):

jedes bewegte Teilchen oder Objekt hat eine zugeordnete Welle
mit der Wellenlänge $\lambda = \frac{h}{|\vec{p}|}$

Anm: die Dissertation wurde zunächst abgelehnt, erst mit Einstein als zweitem Gutachter angenommen.

Liefert eine Erklärung für die Quantenbedingung im Bohr'schen Atommodell

$$|\vec{L}| = |\vec{r} \times \vec{p}| \rightarrow L = r_n p_n = r_n \frac{h}{\lambda}$$

Materiewellen

Wenn Licht als (klassische) „Welle“ Teilcheneigenschaften besitzt, dann könnten doch „Teilchen“ auch Welleneigenschaften besitzen ?

Postulat von de Broglie (in seiner Dissertation):

jedes bewegte Teilchen oder Objekt hat eine zugeordnete Welle
mit der Wellenlänge $\lambda = \frac{h}{|\vec{p}|}$

Anm: die Dissertation wurde zunächst abgelehnt, erst mit Einstein als zweitem Gutachter angenommen.

Liefert eine Erklärung für die Quantenbedingung im Bohr'schen Atommodell

$$|\vec{L}| = |\vec{r} \times \vec{p}| \rightarrow L = r_n p_n = r_n \frac{h}{\lambda}$$

Umfang der n-ten Elektronenbahn:

$$U_n = 2\pi r_n = 2\pi L \frac{\lambda_n}{h} = n\lambda_n$$
$$L = \frac{nh}{2\pi}$$

Materiewellen

Wenn Licht als (klassische) „Welle“ Teilcheneigenschaften besitzt, dann könnten doch „Teilchen“ auch Welleneigenschaften besitzen ?

Postulat von de Broglie (in seiner Dissertation):

jedes bewegte Teilchen oder Objekt hat eine zugeordnete Welle
mit der Wellenlänge $\lambda = \frac{h}{|\vec{p}|}$

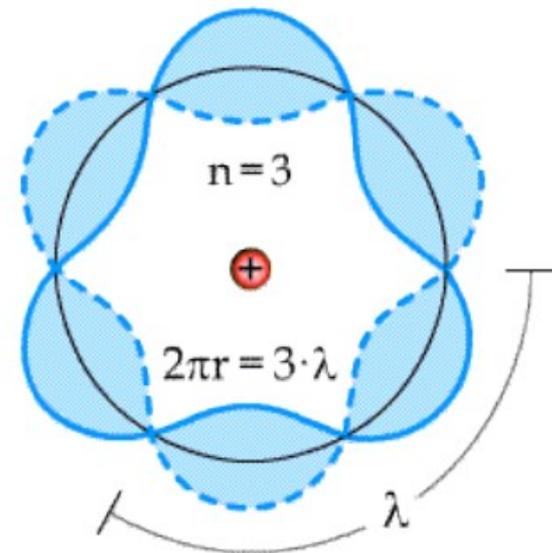
Anm: die Dissertation wurde zunächst abgelehnt, erst mit Einstein als zweitem Gutachter angenommen.

Liefert eine Erklärung für die Quantenbedingung im Bohr'schen Atommodell

$$|\vec{L}| = |\vec{r} \times \vec{p}| \rightarrow L = r_n p_n = r_n \frac{h}{\lambda}$$

Umfang der n-ten Elektronenbahn:

$$U_n = 2\pi r_n = 2\pi L \frac{\lambda_n}{h} = n\lambda_n$$
$$L = \frac{nh}{2\pi}$$



Das Bohr'sch Atommodell

- nutzt klassische Vorstellungen von Teilchen, insb. feste Teilchenbahnen
- beruht auf Postulaten, die keine physikalische Erklärung liefern
- ist in einigen Details nicht richtig (wie wir später noch sehen werden)

Das Bohr'sch Atommodell

- nutzt klassische Vorstellungen von Teilchen, insb. feste Teilchenbahnen
- beruht auf Postulaten, die keine physikalische Erklärung liefern
- ist in einigen Details nicht richtig (wie wir später noch sehen werden)

- Der Ansatz von de Broglie, Teilchen eine Wellenlänge zuzuordnen, wird sich als richtig erweisen;
- die mit der ursprünglichen Idee verknüpfte Vorstellung einer auf einer Kreisbahn umlaufenden Welle ist so allerdings nicht haltbar
(obwohl sich ähnliche Bilder leider immer noch in vielen Büchern finden)

Das Bohr'sch Atommodell

- nutzt klassische Vorstellungen von Teilchen, insb. feste Teilchenbahnen
- beruht auf Postulaten, die keine physikalische Erklärung liefern
- ist in einigen Details nicht richtig (wie wir später noch sehen werden)

- Der Ansatz von de Broglie, Teilchen eine Wellenlänge zuzuordnen, wird sich als richtig erweisen;
- die mit der ursprünglichen Idee verknüpfte Vorstellung einer auf einer Kreisbahn umlaufenden Welle ist so allerdings nicht haltbar
(obwohl sich ähnliche Bilder leider immer noch in vielen Büchern finden)

Wellen sind grundsätzlich nicht lokalisiert – man kann die Lokalisierung eines Wellenphänomens nur durch Bildung von Wellenpaketen erreichen !

Das Bohr'sch Atommodell

- nutzt klassische Vorstellungen von Teilchen, insb. feste Teilchenbahnen
- beruht auf Postulaten, die keine physikalische Erklärung liefern
- ist in einigen Details nicht richtig (wie wir später noch sehen werden)

- Der Ansatz von de Broglie, Teilchen eine Wellenlänge zuzuordnen, wird sich als richtig erweisen;
- die mit der ursprünglichen Idee verknüpfte Vorstellung einer auf einer Kreisbahn umlaufenden Welle ist so allerdings nicht haltbar
(obwohl sich ähnliche Bilder leider immer noch in vielen Büchern finden)

Wellen sind grundsätzlich nicht lokalisiert – man kann die Lokalisierung eines Wellenphänomens nur durch Bildung von Wellenpaketen erreichen !

Die Wellennatur von Teilchen stellt den klassischen Bahnbegriff grundsätzlich in Frage !

Ende Vorlesung 5

Fragen ?