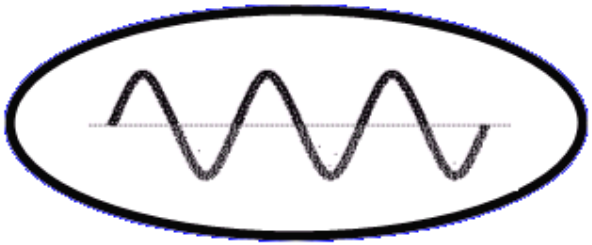
Welle – Teilchen - Dualismus

Quant

Energie E

Masse m



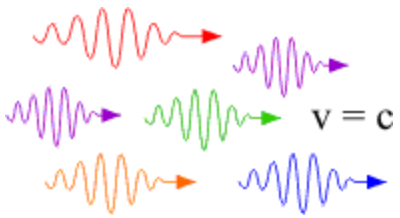
Frequenz f

Impuls p

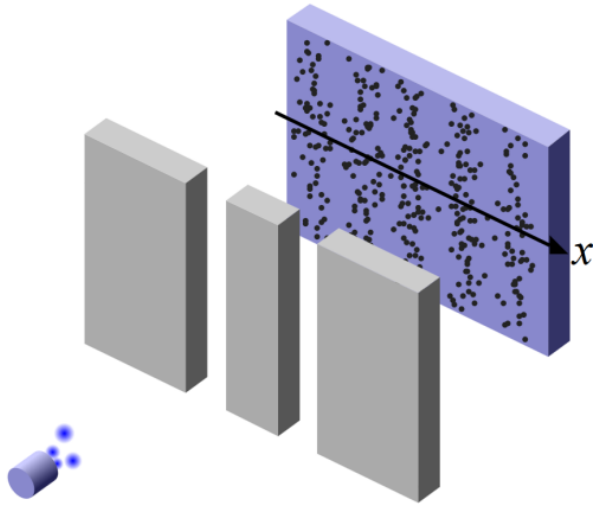
Geschwindigkeit v

Ein Quant entspricht einer Energieportion $E = h \cdot f$

→ z.B. Photon als Lichtquant mit v=c



Quantennatur der Materie



gedankliche Überlegung:

Wenn jeder elektromagnetischen Welle der Wellenlänge λ eine Masse zugeordnet werden kann, dann müsste man jeder (bewegten) Masse auch eine Wellenlänge zuordnen können.

Louis-Victor de Broglie

1992 - Nobelpreis

De Broglie-Hypothese:

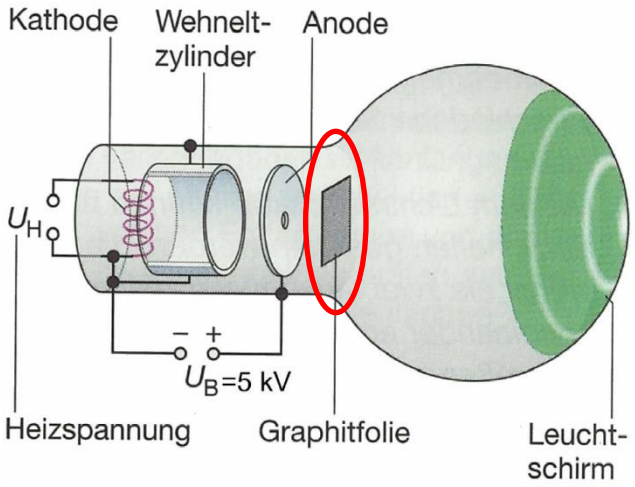
„Wenn Wellen Teilcheneigenschaften besitzen, dann müssten Teilchen auch Welleneigenschaften aufweisen.“

experimenteller Nachweis ?

Beugung und Interferenz von Elektronenstrahlen

Elektronenstrahlinterferenz

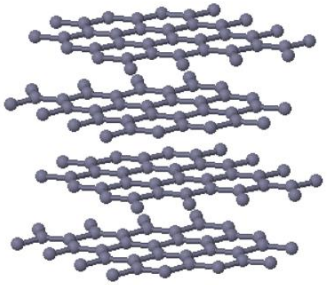
Versuchsaufbau:



Versuchsergebnis:

Der Leuchtschirm zeigt ein typisches Interferenzmuster mit ringförmigen Minima und Maxima.

Am Atomgitter der Graphits findet Beugung und Interferenz von Elektronen statt.



Bewegte Mikroobjekte mit einer Ruhemasse ungleich 0
(Elektronen, Protonen, Neutronen, …) **besitzen Welleneigenschaften.**

Die Wellenlänge wird durch Energie bzw. Impuls des Teilchens bestimmt.

Vergleich von Photonen und Elektronen als Quanten:

Photonen: $m = \frac{h \cdot f}{c^2}$ bzw.: $m = \frac{h}{c \cdot \lambda}$

- bewegen sich mit Lichtgeschwindigkeit c
- besitzen keine Ruhemasse

Elektronen:

- können Lichtgeschwindigkeit nicht erreichen

  $\rightarrow$ bewegen sich mit Geschwindigkeit v<c
- besitzen eine Ruhemasse m_0>0

$m = \frac{h \cdot f}{v^2}$ bzw.: $m = \frac{h}{v \cdot \lambda}$

► Schnell bewegten Elektronen kann eine Wellenlänge zugeordnet werden:

Es gilt: $\boxed{\lambda = \frac{h}{m \cdot v} = \frac{h}{p}}$

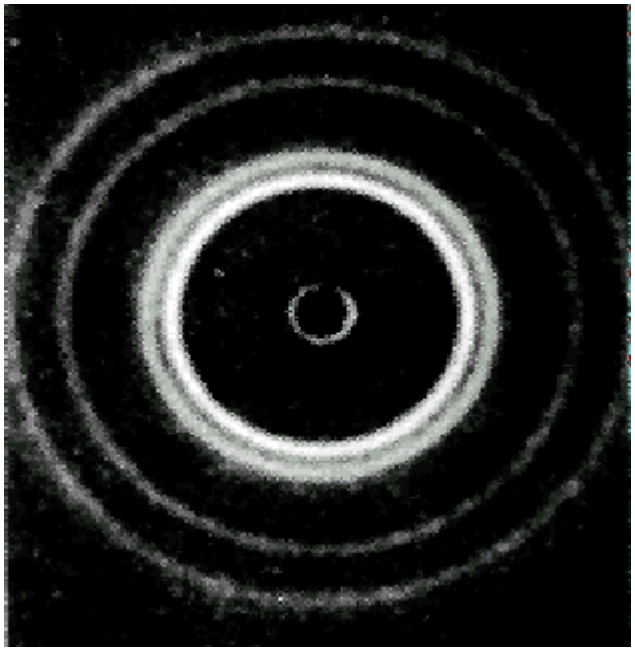
De Broglie-Wellenlänge

(Materiewellen)

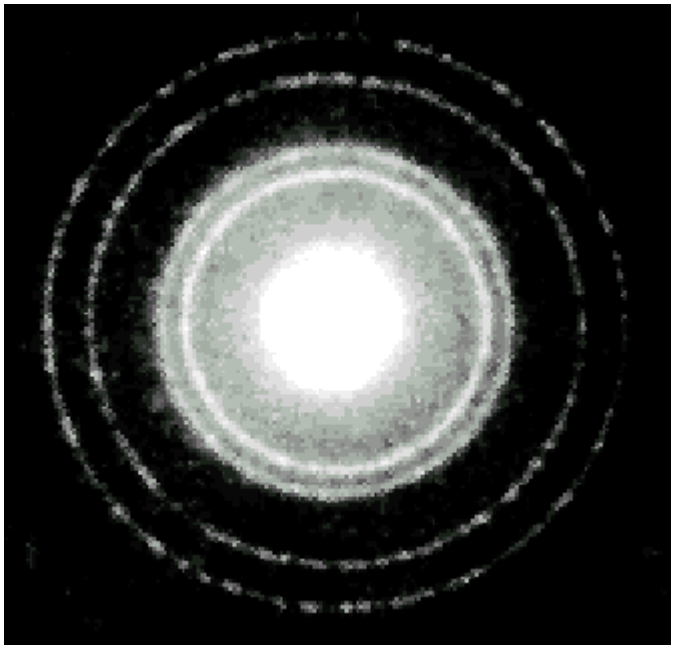
Experiment von Davison und Germer (1925-1927)

Interferenzversuche an einem dünnen Aluminiumblättchen …

… von Röntgenstrahlung
(elektromagnetische Wellen)



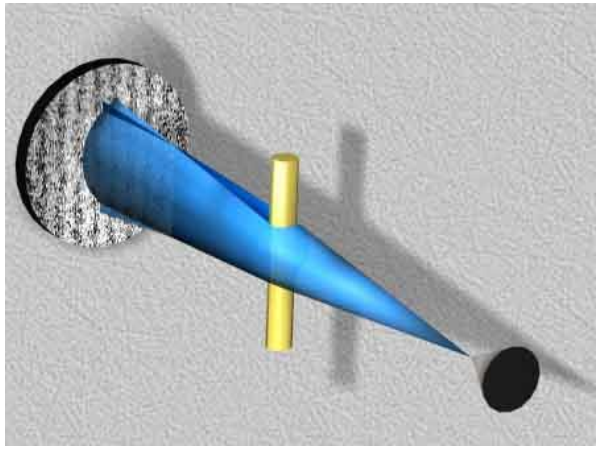
… von schnellen Elektronen
(Teilchen)

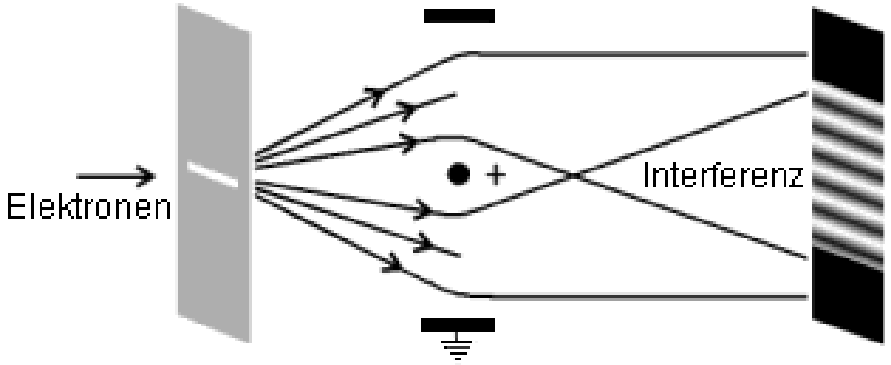


→ (fast) gleiche Interferenzbilder

Versuch von MÖLLENSTEDT und DÜKER:

1955 gelang es in Tübingen Interferenzerscheinungen von Elektronen auch ohne die Durchdringung einer Kristallstruktur von Stoffen nachzuweisen.





Aus einer punktförmigen Quelle wird ein Elektronenstrahl auf einen positiv geladenen vergoldeten Quarzfaden geschossen.

Infolge der Ablenkung im elektrischen Feld gelangen die Elektronen in eine gemeinsame Zone hinter dem Faden.

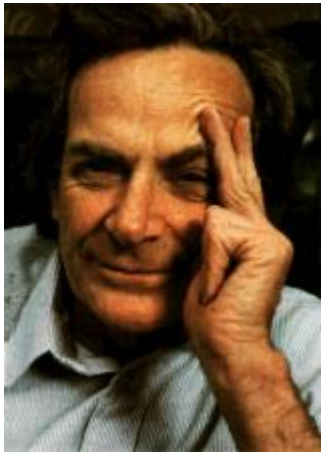
Die Registrierung ergab ein typisches Interferenzbild.

Erklärung der Interferenz von Quantenobjekten:

Richard Faynman

einer der großen Physiker des 20. Jhdt

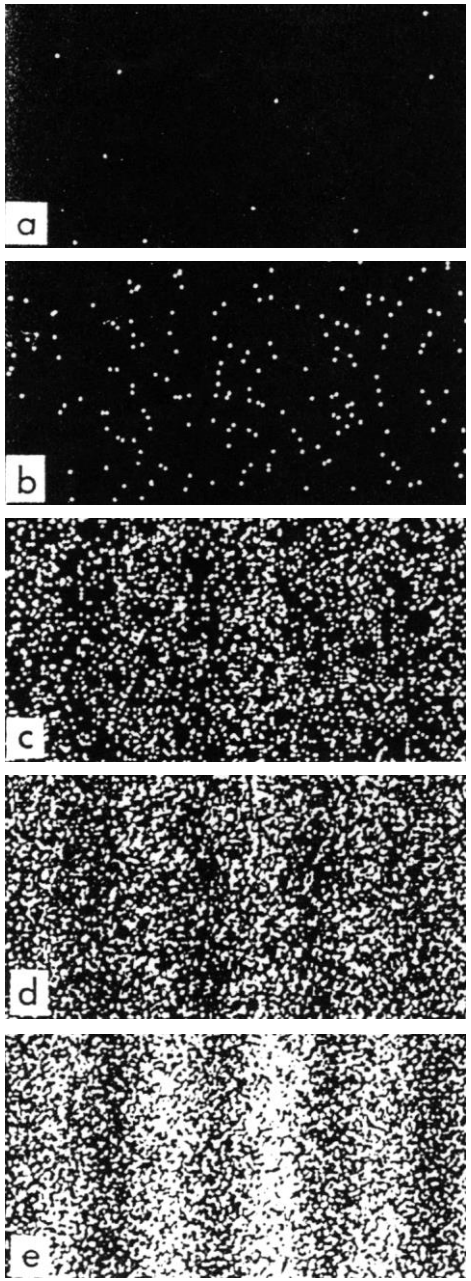
→ Nobelpreis 1965



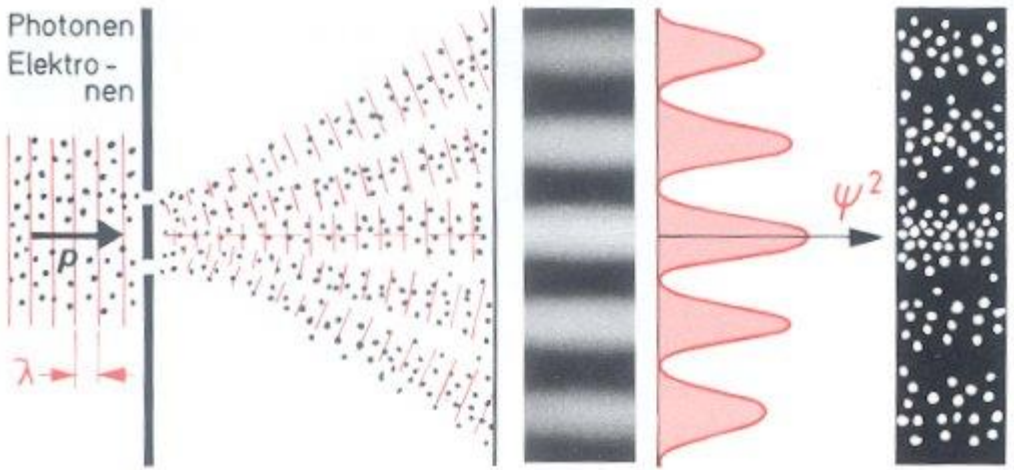
Einzelne Photonen bzw. Elektronen werden einzeln und nacheinander auf einen Doppelspalt geschossen und registriert.

Mit zunehmender Anzahl von Quanten entstehen Bereiche mit Häufungen für das Auftreffen auf dem Schirm.

Die Bereiche mit vielen Auftreffpunkten entsprechen den Maxima einer Interferenzfigur.



Interpretation:



Erwin Schroedinger

Nobelpreis 1933

Die Auftreffpunkte der Quanten (Photonen, Elektronen) hinter einem Doppelspalt können mit Hilfe einer **Wahrscheinlichkeitsverteilung** beschrieben werden.

Die räumliche und zeitliche Entwicklung des Zustands eines Quantensystems wird durch die **Schrödinger-Gleichung** beschrieben.

$$\psi(\mathbf{r},t) = A\ \exp\left(-\frac{\mathrm{i}}{\hbar}\,(Et - \mathbf{p}\cdot\mathbf{r})\right)$$

Ihre Lösungen werden **Wellenfunktionen** genannt.

Schrödingers Katze

→ ein Gedankenexperiment zur Quantenphysik

Katze in einem abgeschlossenen Raum (mit Gift)

Es gibt nur zwei mögliche Zustände !

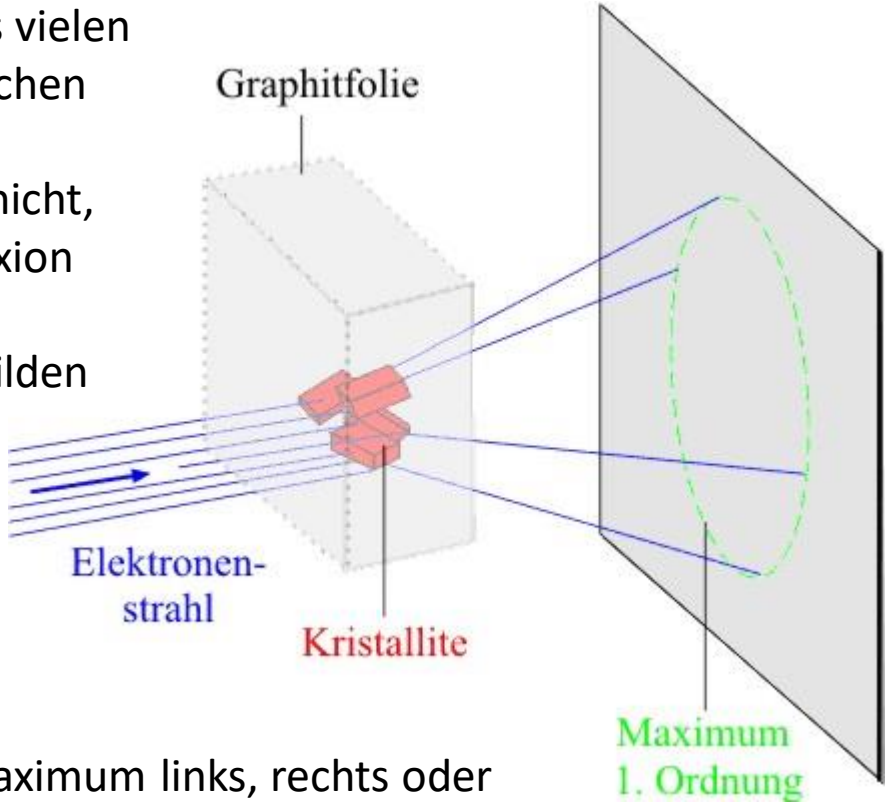
Zustand der Katze ohne Nachzuschauen (tot/lebendig) ?

Welcher Zustand vorliegt kann nur durch eine Wahrscheinlichkeitsaussage beschrieben werden. → Quantennatur

Konkrete Aussage nach Öffnen der Kiste → Klassische Betrachtung

Wie kommt es bei diesem Versuch zu Interferenzringen?

Die polykristalline Graphitschicht besteht aus vielen Minikristallen (Kristalliten), die in allen möglichen Richtungen liegen. Treffen Elektronen (oder Röntgenstrahlung) auf diese Graphitschicht, so entsteht ein Interferenzmaximum in Reflexion nur bei den Kritalliten, die mit der Achse der Wellenstrahlung einen bestimmten Winkel bilden (so dass der Gangunterschied ein ganzzahliges Vielfaches der Wellenlänge ist). Von diesen vielen - für die Interferenz geeigneten Kristalliten liegen manche so, dass das Interferenzmaximum in Bezug zur Strahlachse "oben" liegt.



Andere Kristallite erzeugen das Interferenzmaximum links, rechts oder unten in Bezug zur Strahlachse (vgl. Skizze).
Insgesamt liegen die Interferenzmaxima, welche durch die verschiedenen "günstig" liegenden Kristallite erzeugt werden, auf einem Kreis, durch dessen Mittelpunkt die Achse der einfallenden Strahlung geht.

► Bragg-Reflexion