

Welle – Teilchen - Dualismus

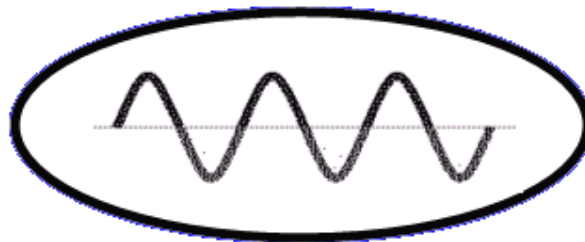


Quant

Energie E

Masse m

Frequenz f

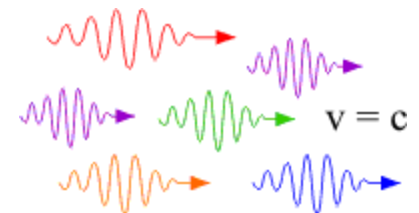


Impuls p

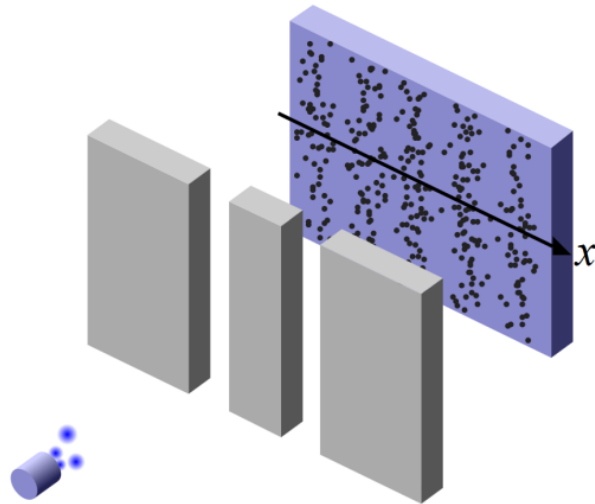
Geschwindigkeit v

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.“

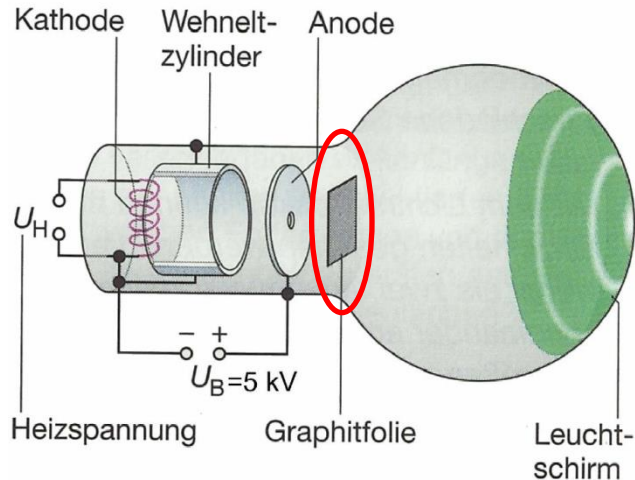


*experimenteller Nachweis
von Wellen ?*

**Beugung und Interferenz von
Elektronenstrahlen**

Elektronenstrahlinterferenz

Versuchsaufbau:

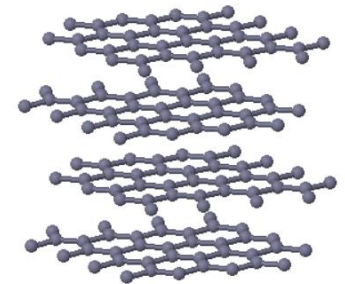


Versuchsergebnis:



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

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

- bewegen sich mit Lichtgeschwindigkeit c
- besitzen keine Ruhemasse

Elektronen

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

- können Lichtgeschwindigkeit nicht erreichen
→ *bewegen sich mit $v < c$*
- besitzen eine Ruhemasse $m_0 > 0$

- Schnell bewegten Elektronen kann eine Wellenlänge zugeordnet werden:

Es gilt:

$$\lambda = \frac{h}{m \cdot v} = \frac{h}{p}$$

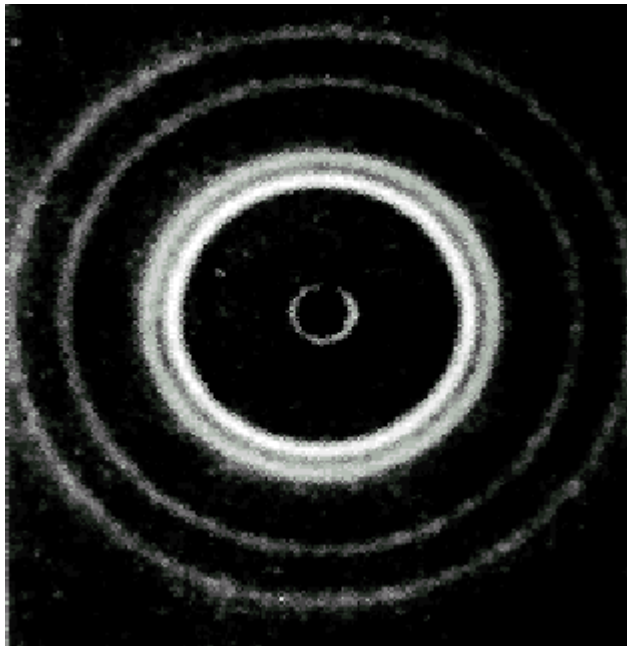
De Broglie-Wellenlänge
(Materiewellen)

Die Geschwindigkeit v und damit die Wellenlänge λ der Elektronen wird durch die Beschleunigungsspannung der Elektronenröhre bestimmt.

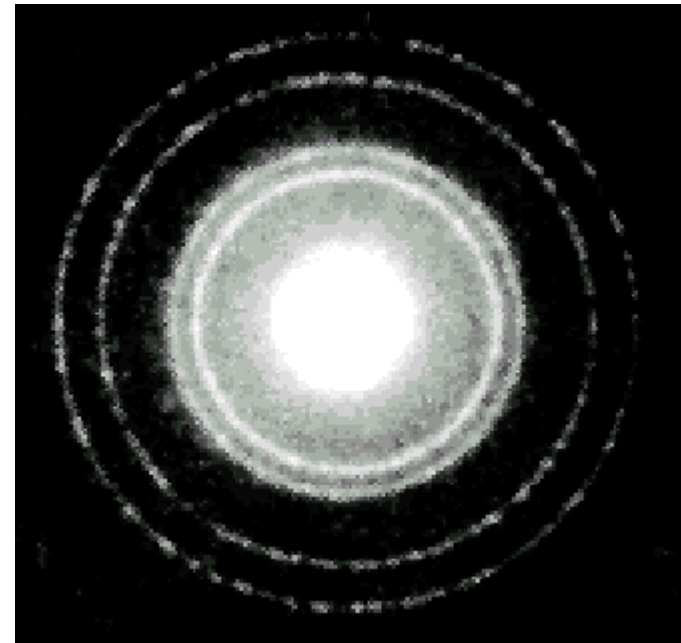
Experiment von Davison und Germer (1925-1927)

Interferenzversuche an einem dünnen Aluminiumblättchen ...

... von Röntgenstrahlung
(elektromagnetische Wellen)



... von schnellen Elektronen
(Teilchen)

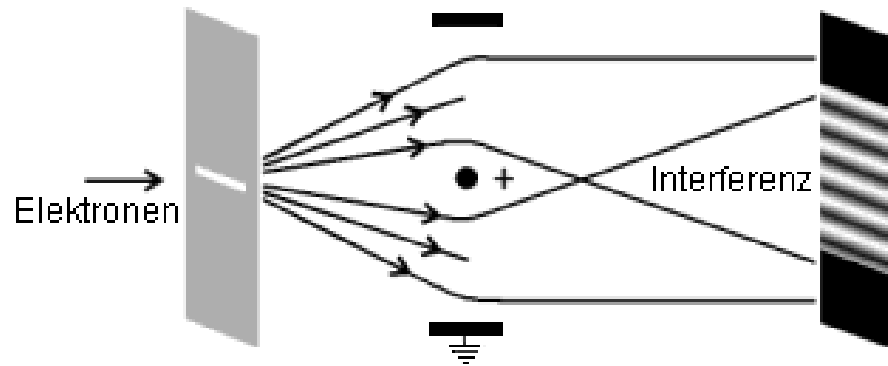
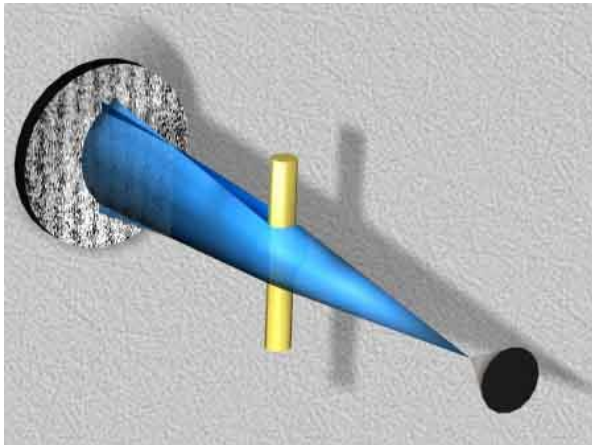


→ (fast) gleiche Interferenzbilder

* Dem Interferenzergebnis liegt die **BRAGG-Reflexion** zugrunde.

Versuch von MÖLLENSTEDT und DÜKER:

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

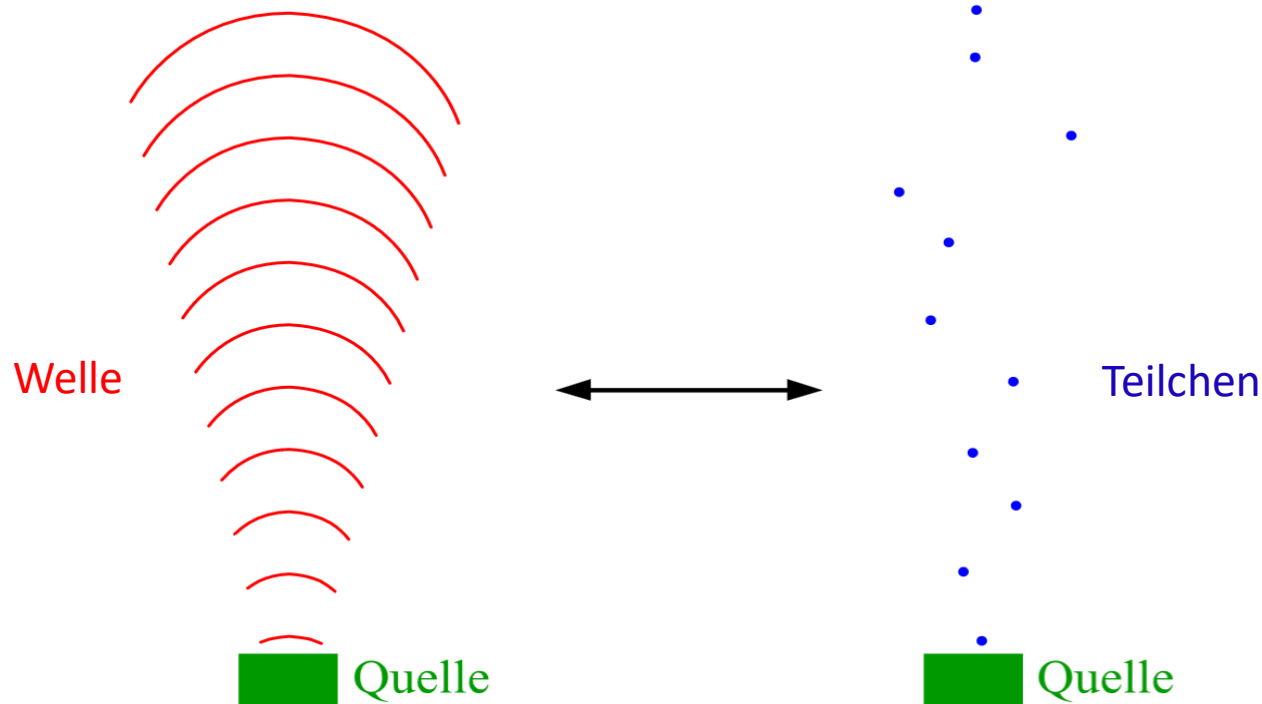


Aus einer punktförmigen Quelle wird ein Elektronenstrahl auf einen positiv geladenen vergoldeten Quarzfaden geschossen.

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

Die Registrierung auf einem Schirm ergab ein typisches Interferenzbild.

Vergleich von Quanten als Welle und/oder als Teilchen



Warum Verhalten sich einzelne Teilchen wie eine Welle ?

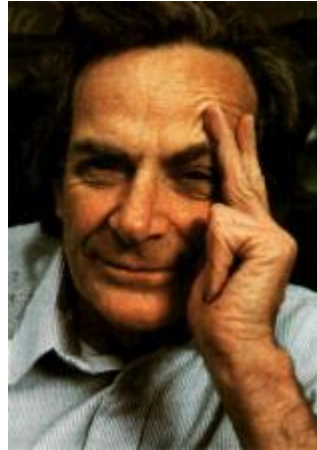
Wie kann ein Interferenzbild mit dem Teilchenmodell erklärt werden ?

Erklärung der Interferenz von Quantenobjekten:

Richard Feynman

einer der großen Physiker
des 20. Jhdt

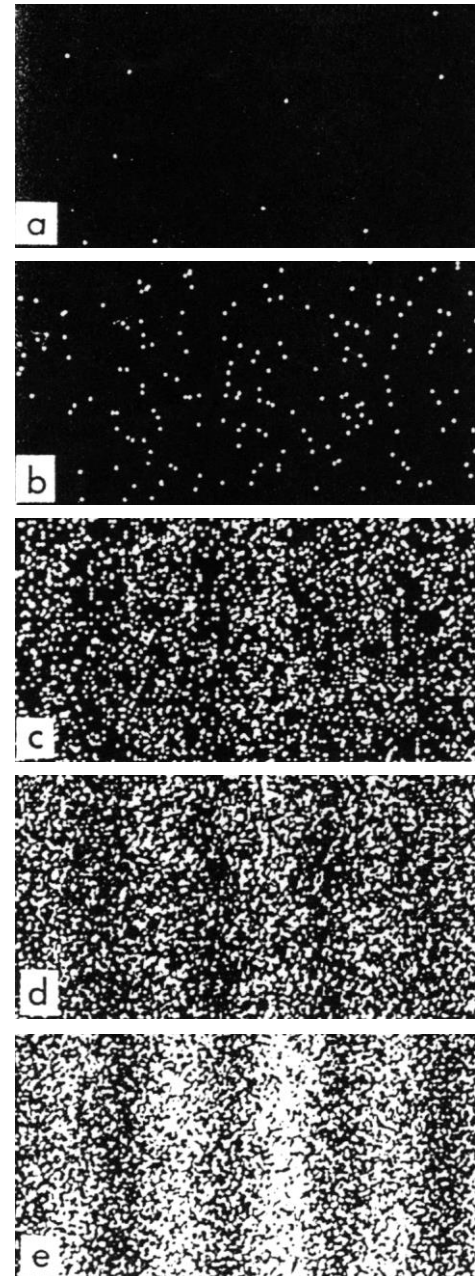
→ Nobelpreis 1965



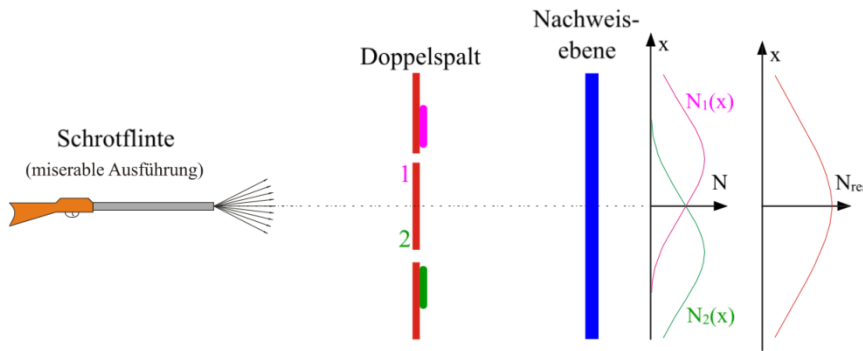
Einzelne Photonen bzw. Elektronen
werden einzeln und nacheinander auf einen
Doppelspalt geschossen und registriert.

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

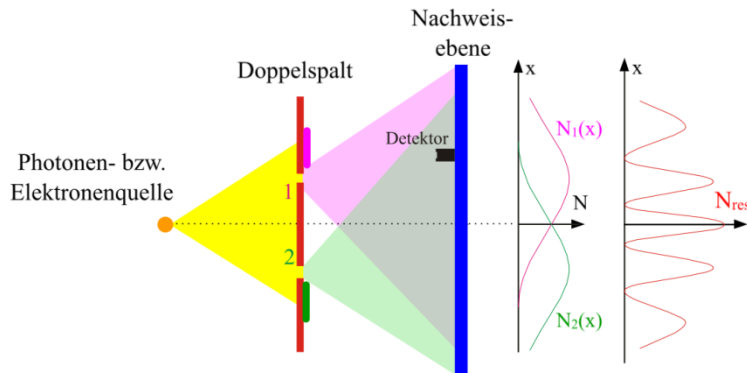
**Die Bereiche mit vielen Auftreffpunkten
entsprechen den Maxima einer
Interferenzfigur.**



Doppelspalt mit (klassischen) Teilchen:

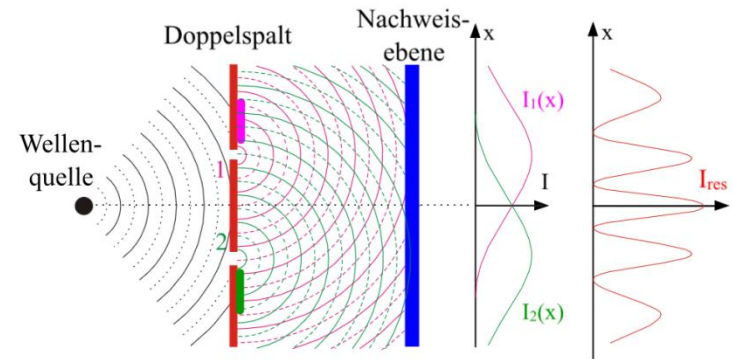


Die Verteilung der Treffer ergibt sich aus der Summe der Treffer aus beiden Spaltöffnungen



Die Verteilung der „Treffer“ ergibt sich nicht wie mit Teilchen, sondern entspricht einem Interferenzbild

Doppelspalt mit Wellen:



Die Verteilung ergibt sich aus der Interferenz der beiden Wellen hinter beiden Spaltöffnungen

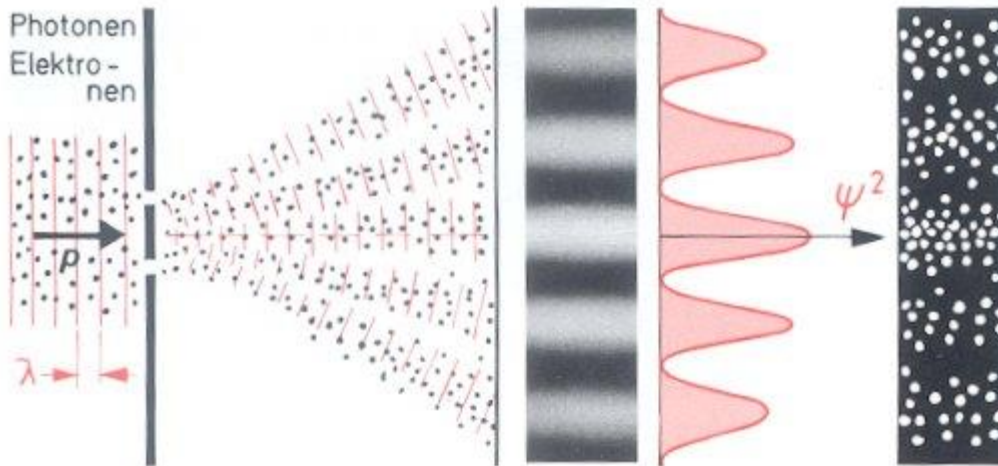
Quanten verhalten sich am Spalt wie Teilchen und am Doppelspalt wie eine Welle.

Quanten sind weder Teilchen noch sind es Wellen.

Quanten sind etwas anderes, etwas Neues!



Interpretation:



Erwin Schroedinger



Nobelpreis 1933

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

- *Für ein einzelnes Quant kann keine exakte Aussage zum Auftreffort gemacht werden.*
- *Die Bewegung eines Quants ist nicht mit einem „Weg“ beschreibbar.*
- *Ein Quant kann beide Spaltöffnungen gleichzeitig nehmen.*

* Mathematische Beschreibung:

Die räumliche und zeitliche Entwicklung des Zustands eines Quantensystems wird durch die **Schrödinger-Gleichung** (1926) beschrieben.

Grundgedanken:

1. Die Ausbreitung bzw. das Verhalten eines Elektrons kann durch eine De-Broglie-Welle mit einer von Zeit und Raum abhängigen Amplitude beschrieben werden.
2. Einen stationären Zustand eines Elektrons mit einer von der Zeit unabhängigen Amplitudenverteilung kann man sich als eine dreidimensionale stehende Welle vorstellen.
3. Das Amplitudenquadrat der stehenden Welle liefert für jeden Ort ein Maß für die Aufenthaltswahrscheinlichkeit des Elektrons.

Sie hat die Form einer partiellen Differentialgleichung.

Ihre Lösungen werden **Wellenfunktionen** genannt.

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

Schrödingers Katze

→ Gedankenexperiment
zur Quantenphysik



- Katze in einem abgeschlossenen Raum (mit Gift)
- Es gibt nur zwei mögliche Zustände (tot - lebendig)
- ohne Nachzuschauen keine Zustandsaussage möglich

Welcher Zustand tatsächlich vorliegt kann nur durch eine
Wahrscheinlichkeitsaussage beschrieben werden.

→ Quanten-
natur

- konkrete Aussage nach Öffnen der Kiste → Klassische Betrachtung

Zum Nachlesen und Anschauen im Internet:

- Mikroobjekte auf [physikunterricht-online](#)
- Quantenphysik auf [leifi-Physik](#)
- Schrödingers Katze auf [wikipedia](#)
- Schrödingers Katze auf [YouTube](#)