

# Quantenmechanik

## Welle oder Teilchen?

Physikalische  $c^{1/4}h$   
sPhErE, 2013-10-10

powered by L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X

- *„Montag, Mittwoch und Freitag ist das Licht eine Welle, Dienstag, Donnerstag und Samstag ist es ein Teilchen und am Sonntag ruht es.“*

*(Unbekannter Autor)*

- *„In sehr kleinen Dimensionen verhalten sich die Dinge wie nichts, von dem wir unmittelbare Erfahrung haben. Sie verhalten sich nicht wie Wellen, nicht wie Teilchen oder irgendetwas, was wir jemals gesehen haben.“*

*(Richard Feynman)*

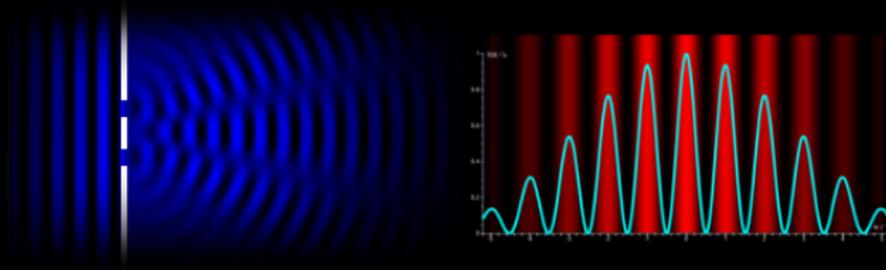
# Überblick

- **Klassische Sicht:**
  - Teilchen wie kleine Billardkugeln auf deterministischen Bahnkurven
  - Atomaufbau wie Sonnensystem
  - **versagt** (auf Mikroebene)
- **Quantenmechanik**  $\in$  **Quantentheorie:**
  - unintuitiv
  - Objekte verschmiert,
    - mal Teilchen-, mal Welleneigenschaften
    - beobachtungsabhängig
  - nicht mehr wegzudenken aus Physik und Alltag (e.g. Mikroelektronik)

warum?

# Quantelung der Lichtwelle

- **Newtons** Vermutung: Licht besteht aus „Klumpen“
- **Huygens et al**: Licht verhält sich wie **Welle**
  - e.g. **Interferenz** am Doppelspalt:



- **Maxwellsche** Elektrodynamik sagt Licht als Lösung der **elektromagnetischen** Wellengleichung voraus
- **Faraday, Hertz**: Licht ist elektromagnetisches Phänomen

# Quantelung der Lichtwelle

- Planck, Einstein: **Lichtquantenhypothese**
  - Feldenergie für eine Freq.  $f$  nur in **diskreten Portionen (Photonen)** von  $E_{min} = hf$ .
  - ...Konsequenz aus **Thermodynamik**: ansonsten Energie der sog. Schwarzkörperstrahlung  $\rightarrow \infty$
  - ...Konsequenz aus **Photoeffekt**: Licht verhält sich wie **Teilchenstrom** mit Energie  $\sim$  Frequenz

# Wellencharakter der Materie

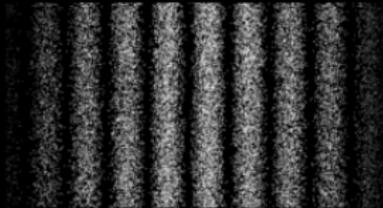
- **de Broglie Hypothese:**

Jedem „Teilchen“ lässt sich „**Materiewelle**“ der Länge

$$\lambda = \frac{h}{\text{Impuls } p} \text{ zuordnen}$$

- **Doppelspaltexperiment** mit massiven Teilchen:

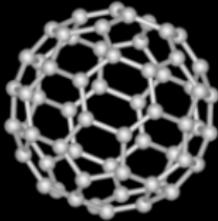
- → Gleiches **Interferenzmuster** wie Licht



- Übereinstimmung Messwerte u. Vorhersagen von de Broglie

# Wellencharakter der Materie

- sogar mit großen Teilchen  
(C60 Fullerene/Buckyballs, Durchmesser  $\sim 4$  nm) !



- **Aber:** Wellenmodell erklärt Teilcheneigenschaften nicht

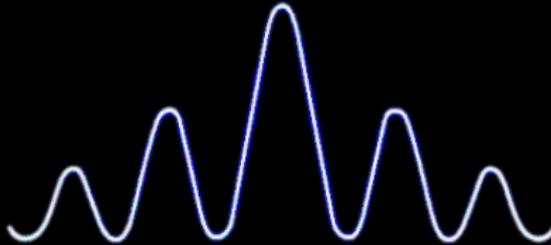
was?

# Welle-Teilchen-Dualismus

- **Ansatz** für quantentheoretischen Formalismus:
- Wenn weder Welle noch Teilchen - was charakterisiert das Objekt vollständig ?
- **Heisenberg, Schrödinger**: Matrizen- und Wellenmechanik
- ...

# Welle-Teilchen-Dualismus

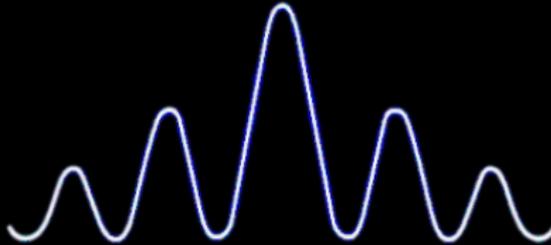
- Aus \$Gründen:
- Erfolgreiche Beschreibung von Quantenobjekten durch komplexwertige (!) „Wellenpakete“ ( $\psi$ -Funktion)



- $\psi$  erfüllt Schrödingergleichung:  
$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} |\psi(\mathbf{x}, t)\rangle = \hat{H} |\psi(\mathbf{x}, t)\rangle$$
- (Aussage: zeitliche Zustandsänderung  $\frac{\partial}{\partial t} |\psi(\mathbf{x}, t)\rangle$  bestimmt durch Energieoperator  $\hat{H}$ )

# Welle-Teilchen-Dualismus

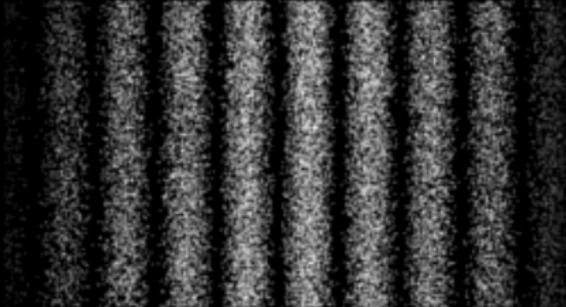
- was darunter vorstellen?



- z.B. **Probabilistische Deutung:**
  - $|\psi|^2$  macht **Wahrscheinlichkeitsaussage** über Fundort bei Messung
  - Bis zur Messung: Teilchen in statistischer Verschmierung
  - Kollaps der Wellenfunktion bei Messung (dazu gleich)

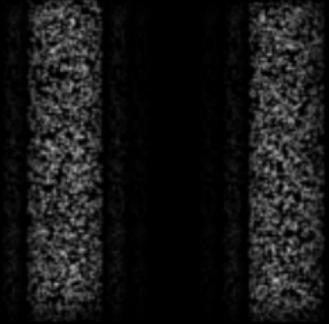
# Welle-Teilchen-Dualismus

- Doppelspaltexperiment: **Interferenzmuster** auch mit **einzelnen Teilchen**.
- $\Rightarrow$  Wahrscheinlichkeit wandert durch beide Spalte, Teilchen „interferiert mit sich selbst“



# Welle-Teilchen-Dualismus

- Welchen Weg nimmt das Teilchen?
- **Registrieren** der Teilchen am Spalt  
⇒ Kein Doppel-, sondern **2 Einzelspaltmuster!**



# Welle-Teilchen-Dualismus

- Sobald Feststellung des Teilchenwegs möglich:  
„Kollaps der Wellenfunktion“
- Messung erzeugt Teilchenverhalten und zwingt Teilchen, durch genau einen Spalt gegangen zu sein
- Mathematisch:  
Projektionsoperator führt Zustandsvektoren ( $\in \mathbb{C}^\infty$ ) in reelle Eigenwerte (= Messwerte) über

# Schlussfolgerungen

- **Falsch**: Ein Quantenobjekt ist ein Teilchen
- **Falsch**: Ein Quantenobjekt ist eine Welle
- (Vereinfachte) Aussage des **Welle-Teilchen-Dualismus**:
  - Wellenpaket umfasst
    - Wellencharakter (bei Ausbreitung)
    - Teilchencharakter (bei Detektion)

**Fragen und so**