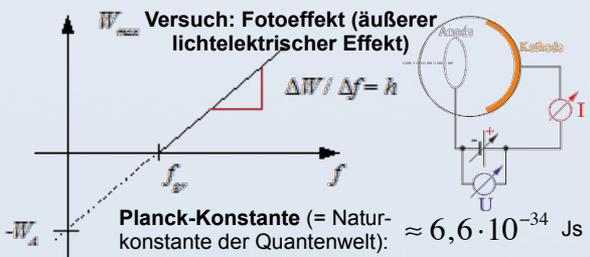


# Quantenobjekt Photon

„Teilchen“  $W_{Ph} = h \cdot f$  „Welle“  $c = \lambda \cdot f$

$$W_{Ph} = m_{Ph} \cdot c^2 \quad \lambda_{Ph} = \frac{h}{m_{Ph} \cdot c}$$

De Broglie Wellenlänge des Photons



**Energiebilanz des Fotoeffekts (Einstein-Gleichung):**

$$W_{Ph} = W_A + W_{kin} \quad h \cdot f = W_A + e \cdot U_{gegen}$$

$(\frac{1}{2} \cdot m_e \cdot v^2)$

- Widersprüche zum Wellenmodell des Lichts:**
1. Der Fotoeffekt setzt sofort ein.
  2. Für den Fotoeffekt existiert eine Grenzfrequenz.
  3. Die Lichtintensität wirkt sich nur auf den Fotostrom aus, **nicht** auf die Fotospannung.

**Achtung:** Das Experiment zum Fotoeffekt (äußerer lichtelektrischer Effekt) kann in 3 Varianten durchgeführt werden:

1. Messung des Stroms der Fotoelektronen
2. Messung der in der Fotozelle aufgebauten Spannung
3. Messung der Gegenspannung bei  $I = 0$

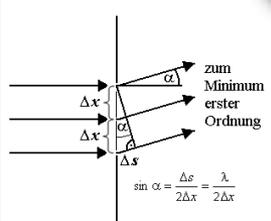
**Hinweis:** siehe auch h-Bestimmung über LED-Versuch

# UBR

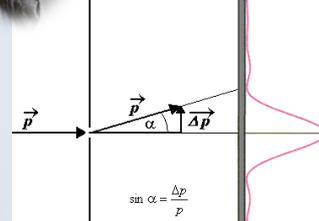


Heisenberg

**Beugung am Einzelspalt im Wellenmodell**



**Beugung am Einzelspalt im Quantenmodell**



Je kleiner der Spalt, desto stärker ist der Beugungseffekt.

$$\Delta x \cdot \Delta p > \frac{h}{4\pi}$$

Die **Unbestimmtheit** ist keine Messungenauigkeit, sondern es handelt sich um ein Naturgesetz! Sie macht sich allerdings nur in der Welt der kleinsten Dimensionen bemerkbar.

# Einsteins Quanten



$$\text{Energieeinheit} \quad 1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

# Quantenobjekt Elektron

„Teilchen“  $W_{kin} = \frac{1}{2} \cdot m_e \cdot v^2$  „Welle“  $\lambda_e = \frac{h}{m_e \cdot v_e}$



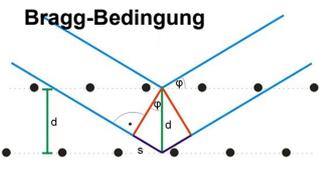
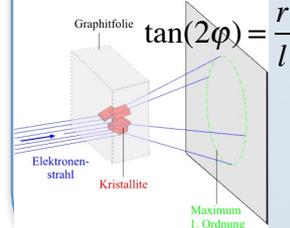
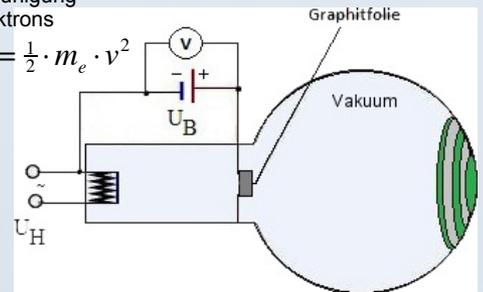
**Materiewelle** nach De Broglie  $\lambda = \frac{h}{p}$

(Be-)Deutung: siehe **Wahrscheinlichkeitsinterpretation** (Max Born)

**Versuch: Elektronenbeugung**

Beschleunigung des Elektrons

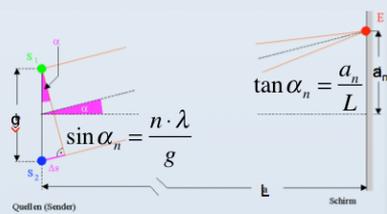
$$e \cdot U_B = \frac{1}{2} \cdot m_e \cdot v^2$$



Konstruktive Interferenz:  $2 \cdot s = k \cdot \lambda$

$\sin \phi = \frac{s}{d} \quad \sin \phi = \frac{k \cdot \lambda}{2 \cdot d}$

## Beugung am Doppelspalt im Wellenmodell (s. Basics Licht)



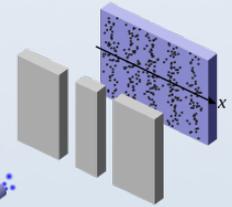
## Einzel-Photonen-Experiment Einzel-Elektronen-Experiment

1. zufällige Verteilung der einzelnen Quantenobjekte auf die beiden Spalte
2. schrittweiser Aufbau des Interferenzbildes
3. Kopenhagener Deutung I: **Wahrscheinlichkeitsinterpretation** der Materiewelle (Max Born)
4. Kopenhagener Deutung II: **Messprozess** → Eingriff in das Quantensystem → Reduzierung des Quantensystems auf einen Zustand (siehe auch: Mach-Zehnder-Interferometer)



*"Es gab eine Zeit, als Zeitungen sagten, nur zwölf Menschen verstanden die Relativitätstheorie. Ich glaube nicht, dass es jemals eine solche Zeit gab. Auf der anderen Seite denke ich, es ist sicher zu sagen, niemand versteht Quantenmechanik."* (Feynman)

## Beugung am Doppelspalt im Quantenmodell



## Komplementarität

Bei Quantenobjekten gibt es Paare von gegensätzlichen Eigenschaften, die untrennbar miteinander verknüpft sind:

1. Eigenschaften von Welle/Teilchen
2. Welcher-Weg-Information/ Interferenzbild
3. Unbestimmtheit bei Ort/Impuls
4. Unbestimmtheit bei Energie/Zeit