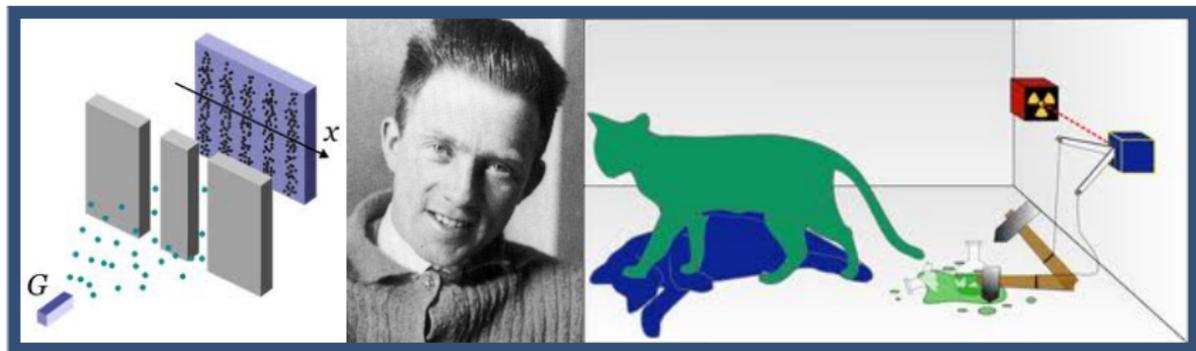


Quantenobjekte

M. Jakob

Gymnasium Pegnitz

16. September 2015



- 1 Wellen- und Teilchencharakter des Lichts (6 Std.)
 - Wellencharakter
 - Teilchencharakter — Photonen
 - Das Planck'sche Wirkungsquantum h
- 2 Wellen- und Teilchencharakter von Elektronen (3 Std.)
- 3 Quantenobjekte (3.Std.)
 - Welle-Teilchen–Dualismus
 - Quantenmechanischer Messprozess

- 1 Wellen- und Teilchencharakter des Lichts (6 Std.)
 - Wellencharakter
 - Teilchencharakter — Photonen
 - Das Planck'sche Wirkungsquantum h
- 2 Wellen- und Teilchencharakter von Elektronen (3 Std.)
- 3 Quantenobjekte (3.Std.)
 - Welle-Teilchen–Dualismus
 - Quantenmechanischer Messprozess

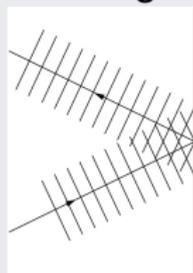
- 1 Wellen- und Teilchencharakter des Lichts (6 Std.)
 - Wellencharakter
 - Teilchencharakter — Photonen
 - Das Planck'sche Wirkungsquantum h
- 2 Wellen- und Teilchencharakter von Elektronen (3 Std.)
- 3 Quantenobjekte (3.Std.)
 - Welle-Teilchen–Dualismus
 - Quantenmechanischer Messprozess

Wellencharakter des Lichtes

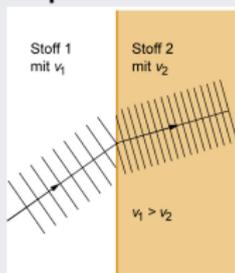
Experimente zum Wellencharakter des Lichtes

Wellencharakter des Lichtes

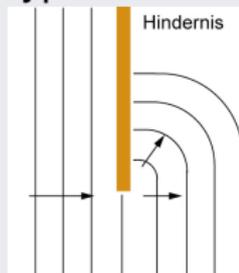
Licht zeigt im Experiment die typischen Welleneigenschaften:



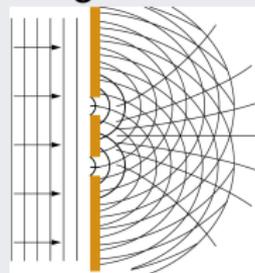
Reflexion



Brechung



Beugung



Interferenz

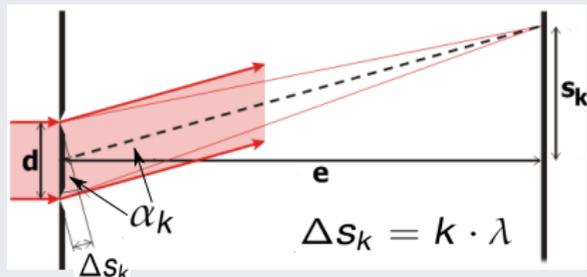
Interferenzbedingung

Interferenzbedingung

Interferenzmuster kommen nur bei Verwendung von **kohärentem Licht**, also Wellenzügen mit fester Phasenbeziehung, zustande. Für die Lage des k -ten Interferenzstreifen bei Interferenz am Doppelspalt und beim Gitter gilt:

$$\sin \alpha_k = \frac{k \cdot \lambda}{d} = \frac{s_k}{e}$$

Beim Gitter sind die Interferenzstreifen deutlicher ausgeprägt.



Wellenlängenbestimmung von Licht

fendt-Applet ➡

Beugung und Interferenz ➡

Ü 1.1: VP Wellenlängenbestimmung von Licht

Übung

Ü 1.2: Beispielaufgabe

- (a) Welchen Abstand zur Mittelachse besitzen das fünfte Hauptmaximum eines Laserlichtes ($\lambda = 532 \text{ nm}$) bei einer Gitterkonstante von 100 Strichen pro Millimeter und einem Schirmabstand von 5 m? Wie groß ist der dazugehörige Ablenkwinkel α_k ?
- (b) Begründe mit Hilfe einer Rechnung, dass alle Abstände benachbarter Maxima gleich sind.
- (c) Wie viele Maxima höchstens zu sehen? Wie kann man die Anzahl dieser Maxima vergrößern?

Ü 1.3: Leifi-Aufgaben ➡

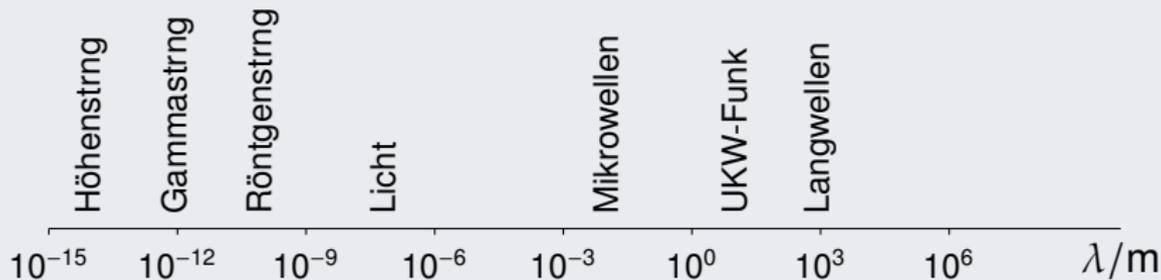
- (a) Interferenz am Gitter
- (b) Interferenz am Doppelspalt
- (c) Spektralanalyse

Das elektromagnetische Spektrum



Das elektromagnetische Spektrum

Das sichtbare Licht umfasst nur einen sehr kleinen Teil des elektromagnetischen Spektrums. Viele andere Erscheinungen beruhen ebenfalls auf elektromagnetischen Wellen.



Wikipedia

- 1 Wellen- und Teilchencharakter des Lichts (6 Std.)
 - Wellencharakter
 - **Teilchencharakter — Photonen**
 - Das Planck'sche Wirkungsquantum h
- 2 Wellen- und Teilchencharakter von Elektronen (3 Std.)
- 3 Quantenobjekte (3.Std.)
 - Welle-Teilchen–Dualismus
 - Quantenmechanischer Messprozess

Versuch von Hallwachs

Ü 1.4: VP Versuch von Hallwachs: Bestrahlung Zinkplatte ➡

Versuch von Hallwachs

Ü 1.4: VP Versuch von Hallwachs: Bestrahlung Zinkplatte ➔

Ergebnis: Fotoeffekt

Die **Strahlung** der Quecksilberdampfampe **löst Elektronen** aus der Zinkplatte aus und zwar **sofort bei Bestrahlungsbeginn**. Diese Herausschlagen der Elektronen funktioniert erst bei hohen Frequenzen. Ist die Frequenz zu niedrig, findet auch bei Erhöhung der Lichtstärke keine Entladung statt.

Deutung: Fotoeffekt

Deutung: Fotoeffekt

- Zum Ablösen der Elektronen ist eine bestimmte sog. Ablöseenergie oder **Austrittsarbeit** W_A erforderlich.
- Licht mit hoher Frequenz hat eine höhere Energie als Licht mit geringerer Frequenz.
- Der Fotoeffekt tritt ein, wenn die Energie des Lichtes höher ist als die Austrittsarbeit.

- Für die Energiebilanz beim äußeren Fotoeffekt gilt:

$$E = W_A + E_{\text{kin}}$$

E Energie des Lichtquants

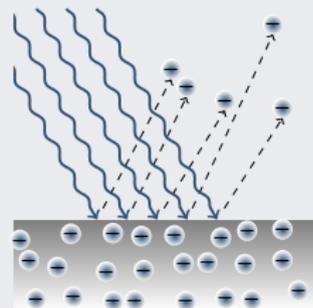
W_A Austrittsarbeit

E_{kin} kin. Energie des ausgelösten Elektrons

Fotoeffekt — Widerspruch zur Wellentheorie

Äußerer Fotoeffekt

Licht kann von Metalloberflächen Elektronen herauslösen und zwar unabhängig von der Lichtintensität aber abhängig von der Lichtfrequenz. Diese Erkenntnis ist genauso wie das „augenblickliche“ Einsetzen des Photoeffekts **nicht mit der Wellentheorie des Lichts vereinbar.**

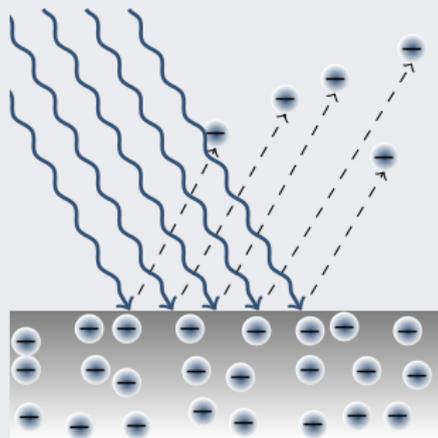


Ausblick: Klassische Erwartungen—Experimentelle Befunde ➔

Fotoeffekt — Ein neues Modell des Lichtes

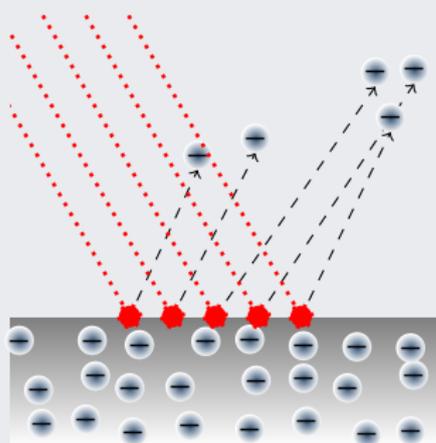
klassisches Modell

Lichtwellen schütteln die
Elektronen frei



neues Modell

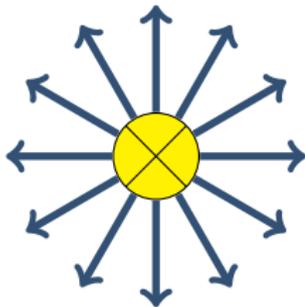
Lichtteilchen, sog.
Photonen, schlagen die
Elektronen heraus



Alle Modelle des Lichts

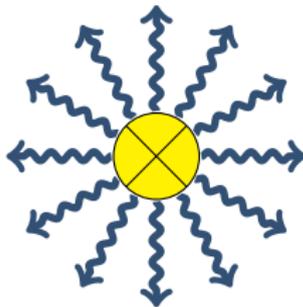


Strahlenmodell



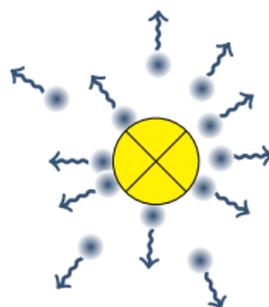
Lichtausbreitung
Schatten
Reflexion
Brechung

Wellenmodell



Beugung
Interferenz

Teilchenmodell



Fotoeffekt

- 1 Wellen- und Teilchencharakter des Lichts (6 Std.)
 - Wellencharakter
 - Teilchencharakter — Photonen
 - Das Planck'sche Wirkungsquantum h
- 2 Wellen- und Teilchencharakter von Elektronen (3 Std.)
- 3 Quantenobjekte (3.Std.)
 - Welle-Teilchen–Dualismus
 - Quantenmechanischer Messprozess

Quantitativer Versuch zum Fotoeffekt

Animationen zum Photoeffekt: phET ➔

fendt: Fotoeffekt ➔

Ü 1.5: VP: Gegenfeldmethode ➔

Quantitativer Versuch zum Fotoeffekt

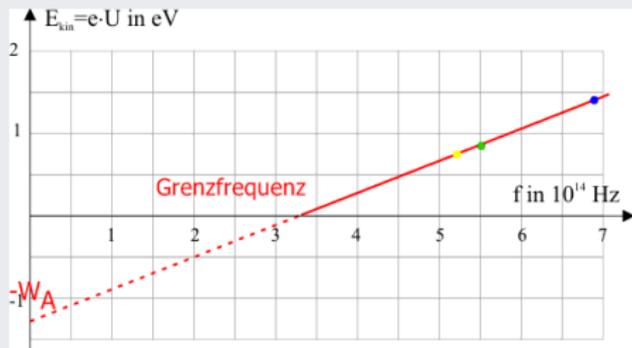
Animationen zum Photoeffekt: phET ➔

fendt: Fotoeffekt ➔

Ü 1.5: VP: Gegenfeldmethode ➔

Ergebnis: Fotoeffekt

$$E_{\text{kin}} + W_A = E_{\text{Phot}} \sim f$$



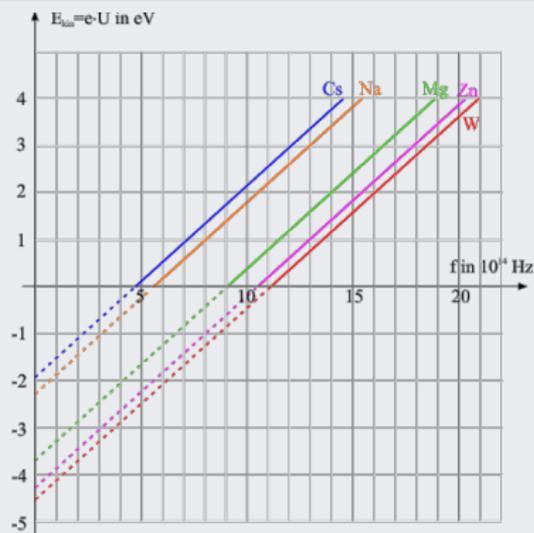
Das Planck'sche Wirkungsquantum h

Das Planck'sche Wirkungsquantum h

Wiederholt man obigen Versuch mit verschiedenen Kathodenmaterialien, so erhält man:

Ergebnis: Fotoeffekt

- Die Grenzfrequenz f_g und die Austrittsarbeit W_A hängen vom Kathodenmaterial ab.
- Die Steigung $\frac{E_{Ph}}{f}$ der Geraden ist materialunabhängig.



Das Planck'sche Wirkungsquantum h

Das Planck'sche Wirkungsquantum h

Die Steigung

$$E_{\text{Ph}}/f = h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$$

der Geraden ist eine Naturkonstante und heißt **Planck'sches Wirkungsquantum h** .

Damit gilt für die Energie E eines Photons der Frequenz f :

$$E = h \cdot f$$

Masse und Impuls eines Photons

Wegen $E = mc^2$ und $p = m \cdot v$ gilt für die Masse m und den Impuls p eines Photons der Frequenz f

Masse und Impuls eines Photons

$$m = \frac{h}{c \cdot \lambda}$$

$$p = \frac{h}{\lambda}$$

Albert Einstein zum Fotoeffekt

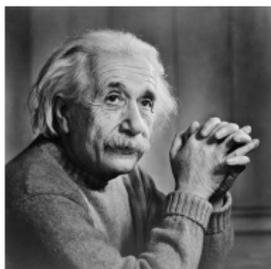


Abbildung :
Albert Einstein
(1879–1955)

„ In die oberflächliche Schicht des Körpers dringen **Energiequanten** ein, und deren Energie verwandelt sich wenigstens zum Teil in kinetische Energie der Elektronen. . . . [Es] wird anzunehmen sein, daß jedes Elektron beim Verlassen des Körpers eine (für den Körper charakteristische) Arbeit W_0 zu leisten hat, wenn es den Körper verläßt.

. . . Die kinetische Energie solcher Elektronen ist

$$E_{kin} = h \cdot f - W_0 \quad [h = 6,626 \text{ J s}]$$

. . . “

Albert Einstein zur Lichtquantisierung

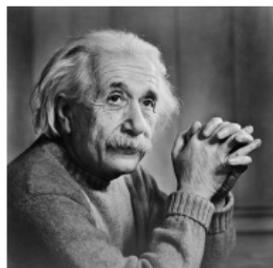


Abbildung :
Albert Einstein
(1879–1955)

„ Es scheint mir nun in der Tat, daß die Beobachtungen . . . [des Fotoeffekts] besser verständlich erscheinen unter der Annahme, daß die Energie des Lichtes diskontinuierlich im Raume verteilt sei. Nach der hier ins Auge zu fassenden Annahme ist bei Ausbreitung eines von einem Punkte ausgehenden Lichtstrahles die Energie nicht kontinuierlich auf größer und größer werdende Räume verteilt, sondern es besteht dieselbe aus einer endlichen Zahl von in Raumpunkten lokalisierten Energiequanten, welche sich bewegen, ohne sich zu teilen und nur als Ganze absorbiert und erzeugt werden können . . . “

Photoeffekt ➡

Nobelpreis an Albert Einstein für den Fotoeffekt



Abbildung :
Albert Einstein
mit Niels Bohr
1925

- Grund: Streitigkeiten des Komitees an der Richtigkeit der Relativitätstheorie.
- 1905 veröffentlichte Einstein drei nobelpreiswürdige Arbeiten:
 - die spezielle Relativitätstheorie
 - eine mathematische Beschreibung der Brown'schen Bewegung
 - eine Erklärung des Fotoeffekts durch die Lichtquantenhypothese
- Titel der Nobelpreisrede:
„Fundamentale Ideen und Probleme der Relativitätstheorie“.

Übung

Ü 1.6: paetec, S. 36f / 6, 7, 8, 9

Ü 1.7: Leifi-Aufgaben ➡

- (a) 10 Fragen zum Photoeffekt
- (b) Schwebende Kupferpartikel
- (c) Photoelektrischer Effekt
- (d) Wellenlängenbestimmung mit einer Fotozelle
- (e) Photoeffekt

- 1 Wellen- und Teilchencharakter des Lichts (6 Std.)
 - Wellencharakter
 - Teilchencharakter — Photonen
 - Das Planck'sche Wirkungsquantum h
- 2 Wellen- und Teilchencharakter von Elektronen (3 Std.)
- 3 Quantenobjekte (3.Std.)
 - Welle-Teilchen–Dualismus
 - Quantenmechanischer Messprozess

Quanten überall?

	klassisches Modell	Quantenphysik
Licht	Welle	Welle–Teilchen-Dualismus
Elektronen	Teilchen	? Welle–Teilchen-Dualismus ?
alles		? Welle–Teilchen-Dualismus ?

De-Broglie-Wellenlänge

Louis de Broglie (1889-1987)

Wenn Licht mit Elementen des Teilchenmodells beschrieben werden muss, dann sollte auch Materie mit Elementen der Wellentheorie zu beschreiben sein.

De-Broglie-Wellenlänge

Wegen $p = \frac{h}{\lambda}$ und $p = m \cdot v$ gilt:

De-Broglie-Wellenlänge

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

h Planck'sches Wirkungsquantum

m Masse des Quantenobjektes

v Geschw. des Quantenobjektes

p Impuls des Quantenobjektes

Ü 2.1: Welchen Spaltabstand benötigt man, um Interferenz an Elektronen nachweisen zu können?

Experimenteller Nachweise

Ü 2.2: VP Elektronenbeugung ➔

Übung

Ü 2.3: paetec S.21, Elektronenmikroskop:
Kurzzusammenfassung

Ü 2.4: <http://www.leifiphysik.de/themenbereiche/quantenobjekt-elektron/aufgaben>

YouTube: Materiewellen und Beobachtungsprojektion ➡

Übung

Ü 2.5: paetec-Aufgaben S. 37

- (a) Nummer 11
- (b) Nummer 12
- (c) Nummer 13

- 1 Wellen- und Teilchencharakter des Lichts (6 Std.)
 - Wellencharakter
 - Teilchencharakter — Photonen
 - Das Planck'sche Wirkungsquantum h
- 2 Wellen- und Teilchencharakter von Elektronen (3 Std.)
- 3 Quantenobjekte (3.Std.)
 - Welle-Teilchen–Dualismus
 - Quantenmechanischer Messprozess

- 1 Wellen- und Teilchencharakter des Lichts (6 Std.)
 - Wellencharakter
 - Teilchencharakter — Photonen
 - Das Planck'sche Wirkungsquantum h
- 2 Wellen- und Teilchencharakter von Elektronen (3 Std.)
- 3 Quantenobjekte (3.Std.)
 - **Welle-Teilchen–Dualismus**
 - Quantenmechanischer Messprozess

Niels Bohr zur Quantenphysik



*"Wer von der Quantentheorie nicht
schockiert ist, der hat sie nicht verstanden."*

Abbildung :
Niels Bohr
(1885–1962)

Richard Feynman zur Quantenphysik



Abbildung :
Richard
Feynman
(1918–1988)

“Es gab eine Zeit, als Zeitungen sagten, nur zwölf Menschen verstünden 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.”

Welle-Teilchen Dualismus

Man darf sich ein Photon nicht als lokalisiertes Gebilde mit einem festen Ort vorstellen; man kann ihm die Eigenschaft „Weg“ nicht ohne weiteres zuschreiben.
allgemeiner:

Welle-Teilchen Dualismus

Objekte der Quantenphysik zeigen sowohl Eigenschaften von klassischen Wellen (z.B. Interferenz) wie auch Eigenschaften von klassischen Teilchen (z.B. Ortslokalisierung zu einem bestimmten Zeitpunkt).

Quantenobjekte bei Leifi ➡

Verständnisfrage: Quantenobjekt Photon ➡

Niels Bohr zum Welle-Teilchen-Dualismus



Abbildung :
Niels Bohr
(1885–1962)

"Wenn mir Einstein ein Radiotelegramm schickt, er habe nun die Teilchennatur des Lichtes endgültig bewiesen, so kommt das Telegramm nur an, weil das Licht eine Welle ist."

Richard Feynman zum Welle-Teilchen-Dualismus



Abbildung :
Richard
Feynman
(1918–1988)

“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.”

Max Born zum Welle-Teilchen-Dualismus



Abbildung :
Max Born
(1882 - 1970)

*“Die Quanten sind doch eine hoffnungslose
Schweinerei.”*

Statistische Interpretation

Statistische Interpretation

Die Quantenmechanik macht statistische Aussagen über die relative Häufigkeit der Ergebnisse bei oftmaliger Wiederholung des gleichen Experiments. Aussagen über Einzelereignisse sind im Allgemeinen nicht möglich.

Albert Einstein zur statistischen Interpretation

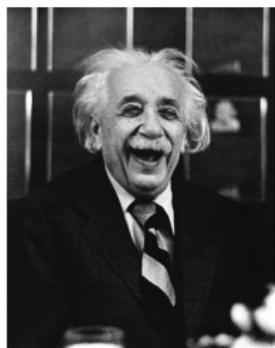


Abbildung :
Albert Einstein
(1879–1955)

"Die Quantenmechanik ist sehr Achtung gebietend. Aber eine innere Stimme sagt mir, dass das noch nicht der wahre Jakob ist. Die Theorie liefert viel, aber dem Geheimnis des Alten bringt sie uns kaum näher. Jedenfalls bin ich überzeugt, dass der Alte nicht würfelt"

(Brief an Max Born, 4. Dezember 1926)

- 1 Wellen- und Teilchencharakter des Lichts (6 Std.)
 - Wellencharakter
 - Teilchencharakter — Photonen
 - Das Planck'sche Wirkungsquantum h
- 2 Wellen- und Teilchencharakter von Elektronen (3 Std.)
- 3 Quantenobjekte (3.Std.)
 - Welle-Teilchen-Dualismus
 - Quantenmechanischer Messprozess

Messprozess und Komplementarität

Bei seiner „unbeobachteten“ Ausbreitung im Raum befindet sich ein Elektron zu keiner Zeit an einem bestimmten Ort, d.h. es besitzt die Eigenschaft „Ort“ nicht.

Komplementarität

Ortseigenschaft und Interferenz sind nicht gleichzeitig realisierbar, sondern schließen sich gegenseitig aus.

Unschärferelation

LV Laserlicht durch immer engeren Spalt

Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation

Es ist nicht möglich, ein Ensemble von Quantenobjekten gleichzeitig den Ort und Impuls genau zu messen. Ist die Streuung der Ortsmesswerte Δx klein ist, wird die Streuung der Impulsmesswerte Δp_x groß sein (und umgekehrt). Es gilt der Zusammenhang:

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \frac{h}{4\pi} \quad [h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J s}]$$

Vertiefung / Übung

Lesch: Ist Schrödingers Katze tot ➡

Videos zur Quantenphysik: Bild zu Lesch: Ist Schrödingers Katze tot ➡

Ü 3.1: Leifi-Aufgaben ➡

- (a) Materiewellen
- (b) Bewegte Elektronen
- (c) Ausrede des Torwarts
- (d) Materiewellen bei Fullerenen

- 1 Wellen- und Teilchencharakter des Lichts (6 Std.)
 - Wellencharakter
 - Teilchencharakter — Photonen
 - Das Planck'sche Wirkungsquantum h
- 2 Wellen- und Teilchencharakter von Elektronen (3 Std.)
- 3 Quantenobjekte (3.Std.)
 - Welle-Teilchen–Dualismus
 - Quantenmechanischer Messprozess

