

Quantenphysik

Die Quantenhypothese, die Max Planck 1900 aufstellte, um das Problem der **Ultraviolett-Katastrophe** zu lösen, revolutionierte die Physik. In der Quantenphysik sind u.a. folgende Phänomene anders, als in der klassischen Physik:

Klassische Physik	Quantenphysik
Licht = elektromagnetische Welle	Licht = Welle und Teilchen (Welle-Teilchen-Dualismus)
Elektronen = Teilchen	Elektronen = Welle und Teilchen
Alles ist determiniert	Viele Prozesse laufen zufällig ab und können nicht vorhergesagt werden

Licht als Welle

Durch das Doppelspaltexperiment konnte "gezeigt" werden, dass Licht eine Welle ist. Aufgrund der Interferenz der beiden Wellen (zwei Spalte) entstanden mehrere kleine Erhebungen in der Intensität, mit der größten Intensität in der Mitte - dies wäre bei Teilchen nicht der Fall (zwei gleich große Erhebungen). Daher wurde ein Wellenmodell angenommen.

Licht als Teilchen

Newton beschrieb Licht aufgrund folgender Eigenschaften als Teilchen:

- Gerade Bewegung im Raum
- Reflexion (vgl. Fußball prallt von der Wand ab)
- Brechung

Doch diese Eigenschaften können auch anhand des Wellenmodells beschrieben werden, und das Doppelspaltexperiment kann ausschließlich mit Wellen erklärt werden.

Rayleigh und die Ultraviolett-Katastrophe

Ein **Schwarzer Körper** absorbiert 100% jeder Strahlung und emittiert Wärmestrahlung (jeder Körper gibt Wärmestrahlung ab, abhängig von seiner Temperatur). Mit zunehmender Temperatur wird die abgestrahlte Energie größer und die Wellenlänge kleiner.

Rayleigh und Jeans stellten eine Formel auf, die die Schwarzkörperstrahlung bei hohen Wellenlängen gut beschreiben konnte, bei geringen Wellenlängen divergiert die Strahlungsdichte

jedoch richtung ∞ (es gibt jedoch keine *unendliche* Energie \rightarrow Widerspruch).

Max Planck sah die Energie nicht wie bisher als Größe, die jeden beliebigen Wert annehmen kann, sondern als Energiepakete (\rightarrow nicht mehr jeder beliebige Energiewert möglich - nur Vielfache der Energiepakete). Er modifizierte also die Formel (\rightarrow **Planck'sches Strahlungsgesetz** - Zunahme bis λ maximal, dann asymptotische Abnahme), die auch experimentell bestätigt werden konnte.

λ_{\max} verändert sich gemäß dem Wien'schen Verschiebungsgesetz in Abhängigkeit von der Temperatur:

- Hohe Temperatur \rightarrow kleine Wellenlänge \rightarrow mehr Energie
- Strahlung ab 600°C sichtbar
- Strahlung unabhängig von Material/Oberfläche des Körpers

“ Planck'sches Wirkungsquantum

$$h = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$$

Die Einheit Js (Joulesekunden) beschreibt die Einheit einer Wirkung.

Photoeffekt

Eine negativ aufgeladene Zinkplatte wird mit Licht bestrahlt. Dabei kommt es zum Ladungsausgleich, nicht aber bei jeder Lichtart:

- Die Energie ist von Wellenlänge und Frequenz abhängig (nicht Intensität)
- Bei höherer Intensität werden nur dann mehr Elektronen ausgelöst, wenn auch die Wellenlänge klein genug ist ($<$ Grenzwellenlänge - genug Energie \rightarrow der "Rest" geht in die kinetische Energie des Elektrons über)
- Keine Zeitverzögerung zwischen Lichteinfall und Elektronenaustritt (\rightarrow Widerspruch zum Wellenmodell)

Einstein (der 1921 den Nobelpreis für die Beschreibung des Photoeffekts erhielt) argumentierte Licht aufgrund dieses Versuchs als Teilchen (Widerspruch zum Wellenmodell) \rightarrow **Welle-Teilchen-Dualismus**:

- Ein Photon löst bei ausreichend Energie ein Elektron aus \rightarrow bei hoher Intensität mehr Photonen
- Bei einem Stoß gibt es keine zeitliche Verzögerung (vgl. Ball, der aus einem Loch geschossen wird)

Es gilt, bei unserem Vergleich mit einem Ball: Austrittsarbeit = Masse \cdot Gravitationskonstante \cdot Höhe; Gesamtenergie = Austrittsarbeit + kinetische Energie $\rightarrow E_{\text{kin}} = E - W$

Beim Photoeffekt ergibt sich daraus: E_{kin} (Energie nach dem Stoßprozess) = E_{γ} (Energie des Photons) - W

$$E_{\gamma} = h \cdot f = h \cdot \frac{c}{\lambda}$$

De-Broglie-Wellenlänge

Louis De-Broglie stellte die Frage, ob nicht auch Elektronen Teilchen *und* Welle sein könnten → De-Broglie-Wellenlänge $\lambda_{\text{dB}} = \frac{h}{m \cdot v}$ (für verschiedene Objekte)

Damit Beugung auftritt, muss die de-Broglie-Wellenlänge mindestens etwa so groß sein, wie das Objekt. Daher tritt z.B. bei Menschen keine Beugung auf (es gibt keine so kleinen Objekte).

Heisenberg'sche Unschärferelation

- **Ort und Impuls eines Quantenobjekts lassen sich nicht gleichzeitig beliebig scharf messen** (auch: Energie und Zeit)
- Durch Messung stört man ein Quantenobjekt und verändert dessen Impuls
- Eine exakte Teilchenbahn ist in der Quantenphysik unmöglich

Born'sche Wahrscheinlichkeitsinterpretation

Auch wenn ein Welle-Teilchen-Dualismus nahelag, waren noch folgende Dinge nicht geklärt:

- Teilchen können im Gegensatz zu Wellen lokalisiert werden (**Unschärferelation**)
- Beim Doppelspalt kann nur eine Welle durch beide Spalte gleichzeitig
- Die Messung im Spalt verändert das Ergebnis

Max Born stellte eine Wahrscheinlichkeitsfunktion auf, die die Wahrscheinlichkeit, dass sich das Teilchen innerhalb eines abgeschlossenen Raumes an einem bestimmten Ort befindet, angibt. Die Wahrscheinlichkeit, dass sich das Teilchen im abgeschlossenen Raum befindet, ist immer 1. Durch Messung wird das Elektron gezwungen, sich zu entscheiden, in welchem Bereich es ist → **Messung stört in der Quantenphysik das Objekt.**

Quanteninformatik

Der **Spin** eines Teilchens ist ein Drehimpuls. Der Spin folgt aus der Symmetrie (nicht durch tatsächliche Drehung). Teilchen mit Spin sind durch Magnetfelder beeinflussbar.

Gedankenexperiment

Zwei Teilchen, deren, beispielsweise, Spin *verschränkt* ist, werden bei einem inhomogenen Magnetfeld gemessen. Die Teilchen treffen immer gegensätzlich auf (**Antikorrelation**) → Ergebnis vorherbestimmt/Teilchen kommunizieren (**meinte man - falsch! → Bell-Ungleichung**)

- **Lokalität:** Kommunikation und Bewegungen begrenzt durch Lichtgeschwindigkeit
- **Realität:** Keine Veränderung des Ergebnisses durch Messung

Verschränkte Teilchen

Verschränkte Teilchen besitzen einen gemeinsamen Zustand, den wir nicht als separate Systeme auffassen können. (z.B. rotierende Münze beim Wurf - Kopf & Zahl "zugleich" → "verschränkt")

Entstehung

Verschränkte Teilchen entstehen meist bei gemeinsamer Entstehung (Kristall: 1 Photon → 2 Photonen; Teilchenzerfälle)

Schlussfolgerung

Objekte der Klassischen Physik erfüllen die Bell-Ungleichung, die Quantenmechanik hingegen nicht!

Quantenkryptographie

RSA-Verfahren

Heutzutage weit verbreitetes Verschlüsselungsverfahren. Zum Knacken (ohne Dechiffrierschlüssel) müssten **sehr große Primzahlen faktorisiert** werden, was im Moment unrealistisch lang dauern würde (viele Jahre). Mithilfe eines Quantencomputers könnte dies jedoch schnell gehen.

BB84-Protocol

Da Quantenobjekte bei einer Messung ihren Zustand verändern, hat dieses Verfahren einen "eingebauten" Lauscher-Detektor.

Alice (Sender) wählt zufällig die gemessene Richtung (x oder z). Jede der beiden Richtungen besitzt zwei Möglichkeiten (+ oder -). Auch Bob (Empfänger) wählt eine zufällige Richtung (x oder z), misst den Zustand (+ oder -) und schreibt eine Liste. Alice und Bob vergleichen nun ihre Messrichtungen, nur gleiche werden behalten (etwa die Hälfte). Nun vergleichen Alice und Bob ca. $\frac{1}{3}$ ihrer Messwerte (Lauscherprobe), denn eine Messung (Lauscher) verändert die Werte - hätten nun Alice und Bob die gleiche Messrichtung gewählt, wäre Bobs Wert wieder zufällig → 50%, dass der Lauscher detektiert wird.

Das RSA-Verfahren hingegen beinhaltet keine Möglichkeit auf Lauscher-Detektion.

Quantencomputer

Ein **Bit** ist ein Objekt mit zwei Zuständen (0 oder 1). Ein **Qubit** ist ein Quantenteilchen, das mehrere Zustände gleichzeitig haben kann und sich bei Messung mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit für einen Zustand entscheidet. Als Qubits eignen sich u.a. Photonen (vertikal/horizontal polarisiert), Elektronen (Spin up/down) und Calciumionen. Quantencomputer arbeiten mit Quantengattern (anstatt herkömmlichen Logikgattern). **Sie sind viel schneller, da sie alle Wege mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit auf einmal rechnen können.**

Quantenteleportation

Eine tatsächliche Teleportation ist unmöglich, es wird vielmehr der Zustand übertragen.

Teilchen A soll teleportiert werden. Teilchen B und C, die miteinander verschränkt sind, bilden Start und Ziel. Teilchen A und B werden verschränkt und an Teilchen A eine Messung durchgeführt. Teilchen A beeinflusst dadurch Teilchen B und dieses wiederum Teilchen C, da sie verschränkt sind. Nun wird über klassische Kommunikation (→ begrenzt durch die Lichtgeschwindigkeit!) der Zustand von A weitergeleitet, in 75% der Fälle muss C transformiert werden.

Revision #10

Created 8 November 2025 16:20:02 by Teodor Bátkai

Updated 9 November 2025 18:18:41 by Teodor Bátkai