

Die HEISENBERG'sche Unschärferelation (Unbestimmtheitsrelation)

Klassische Kausalität

In der klassischen Physik ist es möglich, jedem Teilchen durch Angabe der Koordinaten des Orts- bzw. des Impulsvektors zu jeder beliebigen Zeit einen Ort und einen Impuls zuzuordnen. Dadurch wird für makrophysikalische (klassische) Objekte ihr Zustand eindeutig bestimmt. Das Verhalten eines solchen Objektes ist voraussagbar (NEWTON'sche Mechanik).

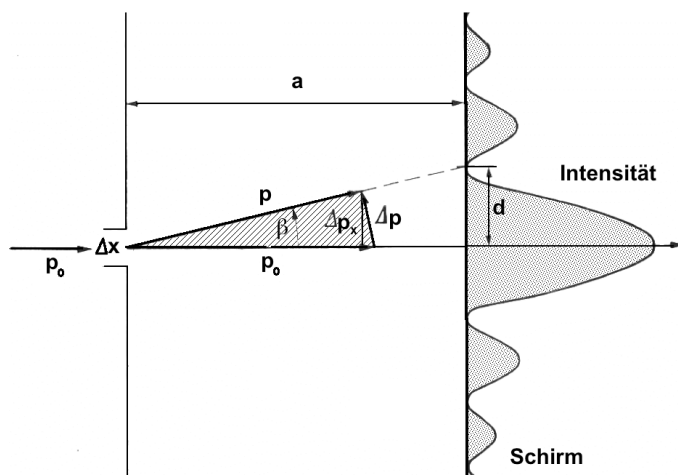
Der Zustand eines Systems ist für jeden Zeitpunkt in der Vergangenheit und in der Zukunft bestimmbar, wenn der augenblickliche Zustand des Systems bekannt ist (Determiniertheit des physikalischen Geschehens/Ursache-Wirkung).

Gedankenexperiment – Herleitung der Beziehung

- Beugung von Licht an einem Spalt
- Photonen haben Impuls und eine Wellenlänge
- Beugung ändert die Ausbreitungsrichtung des Impulsvektors (Photonen werden gestreut)
- Breite des Spaltes ist Maß für den Aufenthaltsort des Photons

Folge:

Bei der Bestimmung des Ortes ändert sich der Impuls des Photons. Die Änderung des Impulses ist umso größer, desto genauer der Ort bestimmt wird (geringere Spaltbreite verursacht eine stärkere Beugung/Streuung).



Der Zusammenhang zwischen der Bestimmung von Ort und Impuls eines mikrophysikalischen Objektes wird durch die HEISENBERG'sche Unbestimmtheitsrelation charakterisiert.

Die Unbestimmtheitsrelation drückt quantitativ aus, dass sich durch Bestimmung der Ortskoordinate eines Mikroobjektes (Quant) und nachfolgender Bestimmung der Impulskoordinate nicht der Wert des Impulses vor der Ortsbestimmung einstellen muss. Die Ortsbestimmung beeinflusst die Impulsbestimmung.

Folgerungen aus der Unschärferelation

- Es ist unmöglich mikrophysikalischen Objekten (Quanten) gleichzeitig einen bestimmten Ort und einen dazugehörigen Impuls zu zuordnen (kein klassisches Teilchen).
- Der Bahnbegriff hat für Quanten keine Bedeutung, da die Beschreibung einer Bahnkurve die gleichzeitige Kenntnis von Ort und Impuls voraussetzt. Bestimmt man die x-Koordinate des Ortes eines Quantenobjektes beliebig genau, so wird die Unbestimmtheit der dazugehörigen Impulskoordinate unendlich groß. Bei einer exakten Bestimmung der Ortskoordinate und gleichzeitiger Bestimmung der Impulskoordinate kann für die Impulskoordinate jeder beliebige Wert mit gleicher Wahrscheinlichkeit auftreten.
- Die Unbestimmtheit mikrophysikalischer Objekte ist unabhängig von der Messgenauigkeit und der Wahl von Messinstrumente eine objektive Eigenschaft von Quantenobjekten. Sie ist in diesem Sinne keine Ungenauigkeit der Messung, sondern stellt eine gewisse Undefiniertheit der Größen bei gleichzeitiger Messung dar. Die Unschärferelation bringt zum Ausdruck, dass sich mikrophysikalische Objekte der klassischen Erkenntnismethode entziehen.

Unbestimmtheit und Wahrscheinlichkeit

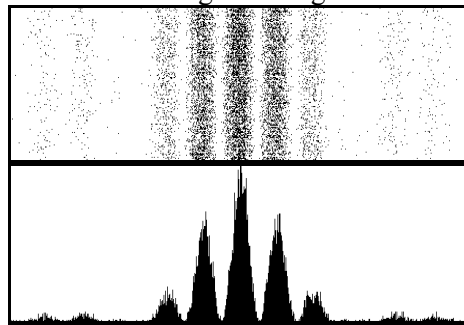
Durch die Unbestimmtheit mikrophysikalischer Objekte ist dieses klassische physikalische Denken nicht mehr anwendbar.

Das TAYLOR-Experiment - Bestätigung der Unschärferelation

TAYLOR bestätigte, dass bei Streuung von einzelnen Photonen das gleiche Verhalten wie bei Elektronen festzustellen lässt. Dabei wird die Streuung von Licht auf einer Fotoplatte aufgezeichnet. Durch Verringerung der Intensität des Lichtes kann man erreichen, dass im zeitlichen Mittel nur ein Photon während der Registrierung auf die Fotoplatte trifft.

Experimentelle Befunde

- Die Auftreffstelle eines Photons kann nicht aus der Auftreffstelle des vorhergehenden Photons bestimmt werden.
- Bestimmte Stellen werden von den Photonen bevorzugt, andere werden gemieden.
- Bei steigender Anzahl der auftreffenden Photonen stellt sich das aus der Wellenoptik bekannte Interferenzbild ein.

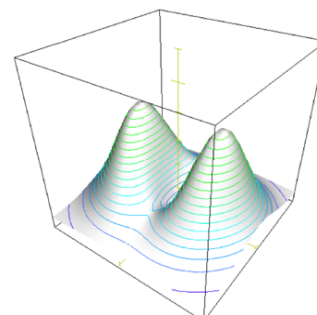


Folgerungen

- Die Verteilung der Photonen auf bestimmte Schirmbereiche ist zufällig, sie unterliegt aber einer Wahrscheinlichkeitsverteilung.
- Die Wahrscheinlichkeitsdichte (Wahrscheinlichkeit/Bereichsbreite) als von der Wahl des Bereiches unabhängiges Maß ist der Intensitätsverteilung des Interferenzbildes proportional.
- Da bei Wellen die Intensität dem Quadrat der Amplitude proportional ist, ist es zweckmäßig für beliebige mikrophysikalische Objekte sogenannte **Materiewellen** einzuführen.

Materiewellen und Wellenfunktion $|\Psi(\vec{x};t)|^2$

Die Wellenfunktion beschreibt den stochastischen Charakter des Verhaltens von Mikroobjekten, sie besitzt aber keine physikalische Bedeutung. Das Quadrat der Wellenfunktion stellt ein Maß für die Wahrscheinlichkeit des Antreffens eines Teilchens an einem bestimmten Ort dar. Mit Hilfe der Wellenfunktion lässt die Wahrscheinlichkeit des Verhaltens eines mikrophysikalischen Objektes voraussagen.



Die Darstellung zeigt die Wellenfunktion für zwei Elektronen in der Atomhülle. Sie erfasst das **PAULI-Prinzip**, welches aussagt, dass sich Hüllenelektronen nicht am selben Ort aufhalten können, weil dort ihre Aufenthaltswahrscheinlichkeit Null ist.

Bei mikrophysikalischen Objekten kommt es zu einer Komplementarität der klassischen Vorstellung von Welle und Teilchen. Quanten verhalten sich je nach der Untersuchungsmethode in manchen Bereichen wie eine Welle in anderen wie ein Teilchen.