

# Würzburger Quantenphysik-Konzept

## Grundfakten der Quantenphysik und heuristische Methoden der QP in der Schule

Horst Hübner – Fortbildungs-Tagung Dillingen 2014

**A objektive Un-be-stimmtheit:** Eine Messgröße erhält erst durch eine Messung einen physikalischen Sinn. Vor der Messung ist die Messgröße nicht Eigenschaft des Systems.

(=> objektive Wahrscheinlichkeiten; Statistik; Born'sche Wahrscheinlichkeitsdeutung)

- Belege: Spinnmesser / Photonen- oder Elektronenzwilling / Bertlmanns Socke
- Folgerung: Ermöglicht „Verständnis“: Viele klassische Erwartungen unbegründet, wie z.B. Ort eines Teilchens ohne eine Messung

**B Komplementarität: Nicht alle klass. denkbaren Eigenschaften sind gleichzeitig messbar**

- Belege/Anwendungen/Beispiele:
  - ◆ Spin-Messung bzgl. unterschiedlicher Spinrichtungen
  - ◆ gleich orientierte Koordinaten von Ort und Impuls
  - ◆ Amplitude/Teilchenzahl und Phase bei einer elektromagn. Welle (Photonen) oder Schallwelle (Phononen)
  - ◆ Gesamtenergie und kinetische Energie / Gesamtenergie und potenzielle Energie / kin. und pot. Energie
- Folgerung: Viele klassische Erwartungen unbegründet, wie z.B. Ort und Impuls eines Teilchens gleichzeitig; Unmöglichkeit einer Teilchenbahn

**C Interferenz ist Konkurrenz von klassisch denkbaren Möglichkeiten, zwischen denen nicht unterschieden wird (Ein-Teilchen-Interferenz)**

- Belege/Anwendungen:
  - ◆ Doppelspalt-Versuch
  - ◆ Mach-Zehnder-Interferometer
  - ◆ Ramsey-Interferometer mit zwei klassisch denkbaren "Energiewegen"
  - ◆ Zustände im Potenzialkasten
  - ◆ Atomare Zustände

**D Welcher-Weg-Information (WWI) und Interferenz sind komplementär zueinander**

- Belege/Anwendungen, z.B.:
  - ◆ Doppelspalt
  - ◆ Mach-Zehnder-Interferometer
  - ◆ keine Folge mechanischer Stöße (Scully-Englert-Walther 1991)
  - ◆ Beugung von Rb-Atomen an einer stehenden Lichtwelle mit möglicher rückwirkungsfreier Wegmarkierung durch Mikrowellen (Rempe 1998)
  - ◆ Knaller-Test
- "Wellen-" oder "Teilchencharakter" sind absurde Erklärungsversuche:
  - ◆ Gravitations-Interferometer
  - ◆ Mach-Zehnder-Interferometer mit verzögerter Entscheidung (Prinzip nach Zeilinger)
  - ◆ Mach-Zehnder-Interferometer mit verzögerter Entscheidung (Realisierung nach Walther et al.)
  - ◆ Quantenauslöcher (z.B. Mach-Zehnder-Interferometer mit Photonen und Polarisatoren im Strahlengang)

## E HUR bei komplementären Messgrößen (HUR als Folge der Komplementarität)

- Aussage
  - ◆ keine Folge mechanischer „Störungen“
  - ◆ lieber anwenden als "herleiten"!
- Anwendungen:
  - ◆ Einfachspalt
  - ◆ Tunnel-Effekt (auch Anwendung der Komplementarität von Gesamtenergie und kinetischer Energie)
  - ◆ elektromagnetische Welle (oder Schallwelle)

## F Revision des Teilchenbegriffs

Ein Teilchen in der Quantenphysik ist ein Quantenobjekt, das abzählbar ist. (Offiziell: Eigenzustand des Teilchenzahl-Operators mit der Teilchenzahl 1)

- Teilchenbegriff hat nichts mit Lokalisierung zu tun! Beleg: im Ortsraum (kurzzeitig) lokalisiertes Teilchen ist im Impulsraum völlig delokalisiert und umgekehrt. Wellenpaket läuft auseinander.
- Elektronen, Photonen, sind immer Teilchen im Sinne der Quantenphysik. Beleg: Millikan-Versuch und Grangier-Versuch
- Teilchen im Sinne der Quantenphysik sind aber keine **klassischen** Teilchen:
  - ◆ klassisch denkbare Eigenschaften sind ohne eine Messung un-be-stimmt (objektive Un-be-stimmtheit)
  - ◆ Teilchen haben komplementäre Messgrößen nie gleichzeitig als Eigenschaften (Komplementarität)
- Bei Mehrteilchen-Zuständen (**verschränkten Teilchen, z.B. Teilchenzwillingen**) existieren ohne eine Messung keine individuellen Teilchen (bzw. haben Teilchen keine individuellen Eigenschaften)
  - ◆ EPR-Zustände von Photonen- und Elektronenzwillingen
  - ◆ Fernwirkungsfreiheit bei Mehrteilchen-Systemen
  - ◆ Widerspruchsbeweis mit Spins eines Elektronenzwillings
- Nicht alle Materie kommt in Teilchen-Zuständen (Zustände mit be-stimmter Teilchenzahl) vor.

Es gibt interessante Beispiele von Systemen mit **un-be-stimmter Teilchenzahl**:

  - ◆ Lasermode (kohärente Photonen, Glauber 1963) (Poisson-Verteilung der Photonenzahl!)
  - ◆ klassische Schwingungszustände von Ionenketten (Blatt) und Kristallen (kohärente Phononen) / Polaritonen
  - ◆ wohl auch Atomlaser (Poisson-Verteilung der Atomzahl im Unterschied zur Bose-Einstein-Verteilung thermischer Atomwolken!)

## Weitere Informationen:

- J. Küblbeck, R. Müller, Die Wesenszüge der Quantenphysik, Aulis Verlag Deubner, Köln, 2003
- E. Fick, Einführung in die Grundlagen der Quantentheorie, Akademische Verlagsgesellschaft, Frankfurt am Main, 1972 (Begriffliches sehr klar!)
- J.J. Sakurai, Modern quantum mechanics, Addison-Wesley, Redwood City, 1985
- M. Le Bellac, Quantum Physics, Cambridge University Press, Cambridge, 2006 (auch mit moderneren Experimenten!)
- A. Zeilinger, Einsteins Schleier, Die neue Welt der Quantenphysik, Beck, München, 2003 (ohne Formalismen; Begriffliches an modernen Experimenten sehr klar dargelegt)
- R. Loudon, The quantum theory of light, Clarendon Press, Oxford, 2000 (kohärente Zustände von Licht)
- Münchner Internetprojekt zur Lehrerfortbildung in Quantenmechanik (Milq) [http://homepages.physik.uni-muenchen.de/~milq/milq\\_basiskursp01.html](http://homepages.physik.uni-muenchen.de/~milq/milq_basiskursp01.html)
- <http://milq.tu-bs.de/index.php/hinweise/downloads/118-simulationsprogramme-download.html>
- <http://www.muthsam.de/doppelspalt.htm>
- <http://www.forphys.de> (Enthält meine Ausführungen noch ausführlicher und noch Vieles mehr.)