

Von der klassischen zur Quantenphysik

Was meinen wir mit klassischer Physik?

Situation um 1900 (vgl. mit heute)

Zusammenbruch der klassischen Physik

Erfolge der Quantenmechanik

Unbestimmtheiten, Wahrscheinlichkeiten,
Indeterminismus

Interpretation und scheinbare Paradoxe

Ist die Quantenphysik vollständig

Gravitation vs. Quantenphysik

Physikalische Theorie

=

math. Formalismus + Interpretation

Entscheidung zwischen Theorien: Experiment,
Anpassung der Wissenschaft an das Milieu
(Forman)??

Klassische Physik

- Mechanik
- Elektrodynamik
- Relativitätstheorie
- Statistische Physik

sehr erfolgreich, deterministisch

MECHANIK: massive (ausgedehnte) Körper

Bewegungsgesetz + Gravitationsgesetz

Erklärt: Lauf der Planeten, Gezeitenwechsel, Bewegung von Körpern auf der Erdoberfläche, Kreisel

ARCHIMEDES, KEPLER, GALILEI, NEWTON, LEIBNITZ, EULER, LAGRANGE, HAMILTON, EINSTEIN.

Deterministisch: Alle Anfangsorte und Geschwindigkeiten \rightarrow LAPLACEScher Dämon könnte gesamte Zukunft und Vergangenheit berechnen.

ELEKTRODYNAMIK: Elektrizität und Magnetismus, elektromagnetische Wellen (Radio, IR, Licht, UV, Röntgen), Optik ist Teildisziplin.

4 Maxwell'sche Gleichungen

VOLTA, COULOMB, OHM, OERSTEDT, AMPERE, FARADAY, MAXWELL, HERTZ

STATISTISCHE PHYSIK: Ansammlung vieler Teilchen, statistische Annahmen \implies Thermodynamik (Druck, Temperatur, Gasgesetze, Entropie, Hydrodynamik), Gase, Flüssigkeiten,

Liouville/Boltzmann-Gleichung, Gleichgewichte

AVOGADRO, LIOUVILLE, LOSCHMIDT, GIBBS, BOLTZMANN

RELATIVITÄTSTHEORIE: schnelle Teilchen, starke Gravitationsfelder, schwarze Löcher, Kosmologie,

relativistische Mechanik
Einsteinsche Feldgleichungen

EINSTEIN, SCHWARZSCHILD, FRIEDMAN

Vorherrschende Meinung bis nach 1900:

Die wichtigsten Grundgesetze und Grundtatsachen der Physik sind alle schon entdeckt, und diese haben sich bis jetzt so fest bewährt, daß die Möglichkeit, sie wegen neuer Entdeckungen beiseite zu schieben, außerordentlich fern zu liegen scheint.

A. MICHELSON 1903

Diese Hoffnung (Befürchtung) erwies sich als FALSCH.

Quantenphysik?

... ich denke, ich kann davon ausgehen, daß niemand die Quantenmechanik versteht

RICHARD FEYNMAN, Nobelpreisträger

25 Prozent des Bruttosozialproduktes kommt von Technologien, die wesentlich auf der Quantentheorie beruhen

LEON LEDERMANN, Nobelpreisträger

Ich weiß nur, dass ein Quant klein ist. Auch wenn die Leute immer große Sprünge meinen, wenn sie von Quantensprüngen reden

FRIEDHELM R., Informatiker

Zusammenbruch der klassischen Physik:

- Schwarze Körper (glühender Stahl)
- Photoeffekt (Lichtteilchen)
- Linienspektren (diskrete Zustände)
- Instabilität der Atome
- Spezifische Wärme von Festkörpern
- Radioaktivität

Quantenmechanik

- Energie der Atome diskont. (PLANCK, 1900)
- Lichtquanten (Licht \sim Teilchen) (EINSTEIN, 1905)
- Das Bohrsche Atommodell (BOHR, 1913)
- Matrizenmechanik (HEISENBERG, 1925)
(unanschaulich, abstrakt, indeterministisch)
- Wellenmechanik (SCHRÖDINGER, 1926)
anschaulich, deterministisch, Teilchen?
- Stat. Interpretation, Streutheorie (BORN, 1926)
 e^- auf Bahnen, indeterministisch, zeitabhängig

Schrödingergleichung $\longrightarrow \psi$??
Wahrscheinlichkeitsdichte $|\psi(x)|^2$
Wahrscheinlichkeitsstrom

Borns Streutheorie:

'Die Bewegung der Teilchen folgt den Wahrscheinlichkeitsgesetzen, die Wahrscheinlichkeit selbst aber breitet sich nach dem KAUSALGESETZ aus'.

'Aber es ist natürlich jedem, der sich damit nicht beruhigen will, unverwehrt, anzunehmen, daß es weitere, noch nicht in die Theorie eingeführte Parameter gibt, die das Einzelereignis determinieren....

Es schien mir zunächst unwahrscheinlich, daß man solche Größen zwanglos in die neue Theorie einfügen könne; aber

Der Doppelspalt

Licht \sim Photonen, Teilchen; Experiment mit sehr schwachem Licht, immer nur ein Photon durch Spalt, trotzdem Interferenzeffekt: WELLENAUSBREITUNG
Interferenz nicht von WW der Photonen, spaltet sich jedes Photon?

Durch welchen Spalt: Photon IST Teilchen

Interferenz-Experiment: Photon IST Welle

Gleiches mit e^- (TONOMURA et.al 1989)

WELLE-TEILCHEN-DUALISMUS

Lichtquanten, Materiewellen

KOMPLEMENTARITÄT

UNSCHÄRFERELATIONEN (prinzipielle Grenzen)

- Teilchen/Welleneigenschaft koexistieren
- in Beobachtung entweder-oder
- raum-zeitliche Lokalisierung → keine Interferenz
- Beobachtung von Interferenz → keine Lokalisierung

Thomson senior (e/m 1897) bekam den Nobelpreis, weil er gezeigt hatte, daß das Elektron ein Teilchen ist, und Thomson junior (e^- -Interferenz) dafür, daß es eine Welle ist.

Beispiel: $x - y$ -Polarisator hinter Doppelspalt (Wege unterscheidbar): keine Interferenz, schalte 45° Polarisator dahinter (Wege ununterscheidbar): Interferenz

Interferenzexperimente mit:

Licht, Elektronen, Neutronen, Atome, Molekülen

Kopenhagener Interpretation: Komplementarität

'Es ist klar, daß der Doppelspaltversuch auf keine Art und Weise mit der Idee in Einklang gebracht wer-

den kann, daß sich Elektronen auf Bahnen bewegen. In der QM gibt es keine Teilchenbahnen' (LANDAU-LIFSCHITZ).

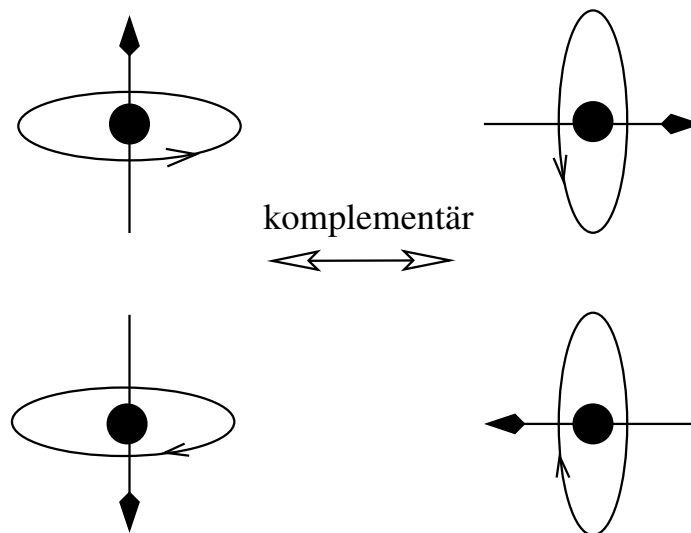
'Um die $1s$ Bahn zu messen, müßt nämlich das Atom mit Licht beleuchtet werden... Von solchem Licht genügt aber ein einziges Quant, um das Elektron aus seiner 'Bahn' zu werfen. Das Wort 'Bahn' hat also hier keinen vernünftigen Sinn.' (HEISENBERG)

Komplementarität

Nur Wellen- *und* Teilchenaspekte von (mikroskopischen?) Objekten ergänzen sich zu einer vollständigen Beschreibung des Objekts (BOHR).

Komplementär sind

- Ort \leftrightarrow Impuls
- Wege des Photons (Elektrons) \leftrightarrow Interferenzmuster
- Spin (magn. Moment) aufwärts \leftrightarrow Spin nach rechts
- vertikale Polarisation \leftrightarrow horizontale Polarisation



Vollständigkeit der QM

- VON NEUMANN'S No-Go-Theorem für verborgene Parameter (1932):
Annahmen \Rightarrow Es gibt keine deterministische Vervollständigung der QM

Gegner von Kopenhagen

'Bohr's Ansatz... ist wirklich bemerkenswert. Er ist davon überzeugt, daß jedes Verständnis im eigentlichen Sinn des Wortes .. unmöglich ist' (SCHRÖDINGER)

'..der statistische Charakter der derzeitigen Quantentheorie ist lediglich der Tatsache zuzuschreiben, daß

mit einer unvollständigen Beschreibung der physikalischen Realität gearbeitet wird (EINSTEIN)

GOTT WÜRFELT NICHT

SCHRÖDINGERS KATZE

Bohmsche Mechanik (1952)

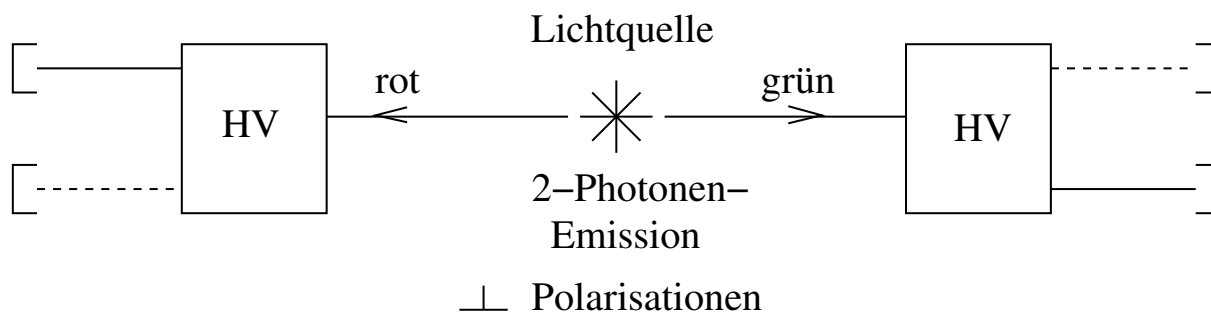
- Deterministische Vervollständigung der QM
- Führungsfeldtheorie für Punktteilchen
- Newtonsche Mechanik als Grenzfall
- NICHTLOKAL

'Metaphysisch' (HEISENBERG)

'zu billig' (EINSTEIN)

keine Reaktion (BOHR)

EPR-Paradox



rechtes Photon horizontal \leftrightarrow linkes Photon vertikal
rechtes Photon vertikal \leftrightarrow linkes Photon horizontal

Ohne rechten HV-Polarisator:

Kennen linksseitige Polarisation erst nach Messung
→ rechtseitige Polarisation ohne sie zu messen!

Ergebnis *erscheint* im voraus durch Eigenschaft der Photonen festgelegt.

Wenn wir den Wert einer physikalischen Größe mit Sicherheit voraussagen können, ohne in irgendeiner Weise das System zu stören, dann existiert ein Element physikalischer Wirklichkeit, das dieser physikalischen Größe entspricht

A. EINSTEIN

Entweder beeinflusst Apparatur ein Photon über eine große Entfernung, oder die Quantentheorie ist deterministisch mit verborgenen Parametern!

Zwei aus dem Zerfall eines neutralen Pions stammende Photonen bilden VERSCHRÄNKTES SYSTEM, bei dem Messungen an beiden Photonen korrelierte Ergebnisse liefern.

Energie bzw. Polarisation den *einen* Teilchens am Ort *dieses* Teilchens gemessen \longrightarrow Energie bzw. Polarisation des *anderen* Teilchens am ganz *anderen* Ort
Ohne Signalübertragung!!

nicht mit unserer Intuition in Einklang
Korrelation unabhängig von räumlicher Entfernung
spukhafte Fernwirkung

BELLSche Ungleichung:

$$\text{Korrelation} = \begin{cases} \geq 1 & \text{lokale Theorien} \\ = 3/4 & \text{Quantenmechanik} \end{cases}$$

Experimentelle Bestätigung von Nichtlokalität durch
ASPECT et.al. 1982

Richtig und wichtig:

- Natur is indeterministisch
- Natur ist beobachterabhängig
- Natur ist nichtlokal
- \longrightarrow QUANTENCOMPUTER

Quantenmechanik beschreibt und erklärt

- *chemische Bindung* von Elementen
- Warum sind Festkörper *Isolatoren*, *Halbleiter* oder *Leiter*
- Quantenelektronik, *Laser*
- *Supraleitung*, *Superfluidität*
- Eigenschaften von *Atomkernen* (starke Kraft)
- Radioaktiver *Zerfall* von Kernen (Tunneleffekt)
- Stabilität von nicht zu schweren *weißen Zwergen* und *Neutronensternen*
- ...