

Grundbegriffe und Interpretationen der Quantentheorie in philosophischer Perspektive

**Workshop der Heisenberg-Gesellschaft
„Quantenphysik an der Schule“
Schloss Lautrach, 11.-13. Juli 2014**

Überblick

1. Eine Einführung in die Grundstrukturen der QTh
2. Interpretationsprobleme
3. Warum Quantenphysik an der Schule:
Ein philosophischer Wunschzettel

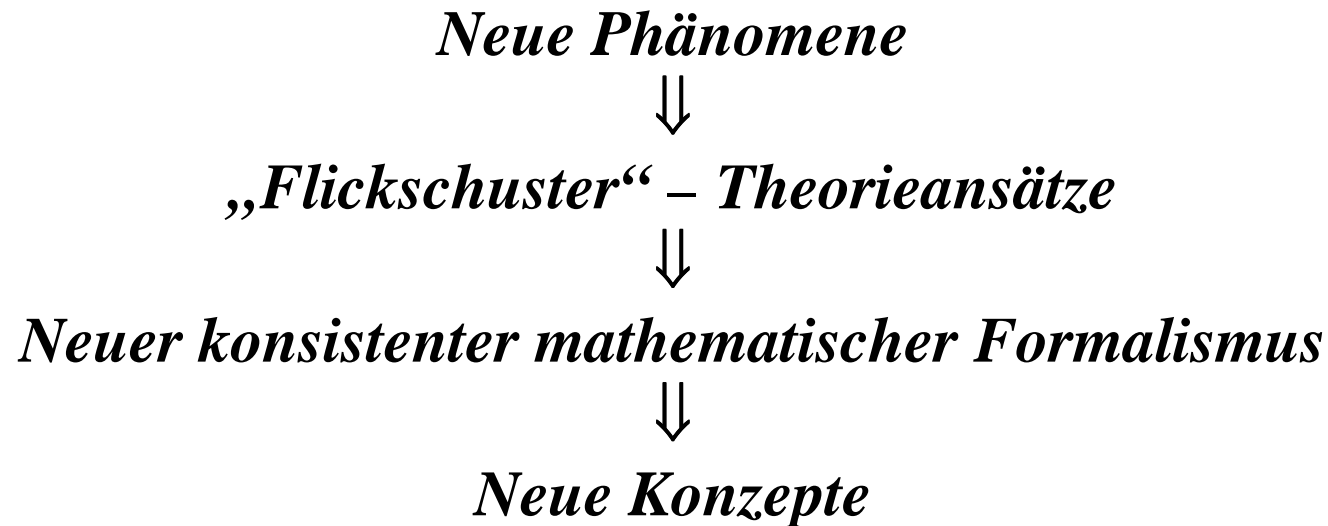
ÜBERSICHT zu Themen einer Vorlesung

**Die Quantenmechanik und die Grenzen der klassischen Vorstellungen
über Teilchen und Felder**

**Grundlagenprobleme der Quantentheorie
und philosophische Probleme in ihrem Umkreis**

- 1. Die Revolution der Quantentheorie**
Warum war man mit der klassischen Physik nicht mehr zufrieden?
- 2. Der Messprozess in der Quantenmechanik**
Zentraler Ausgangspunkt der Grundlagenprobleme
- 3. Interpretationen der Quantenmechanik**
Minimalinterpretation und verschiedene Erweiterungen
- 4. Philosophische Diskussionen im Umkreis der Quantentheorie**
*Bewusstsein und Quantentheorie, Indeterminismus, Realismus und QM,
Vor allem: Quantenmechanik und Holismus (das EPR-Paradoxon)*

Lange historische Entwicklung (1900 – 1935)



Problemfeld: Die Theorie kann nicht aus den Experimenten heraus entwickelt werden.

Zwei Möglichkeiten zur Vorstellung/Einführung einer Theorie:

- (i) *Nachzeichnung der historischen Entwicklung*
- (ii) *Axiomatische Darstellung*

Nachzeichnung der historischen Entwicklung (i):

Vorteil:

Formalismus wird stückweise motiviert.
Schließt an Vorwissen an.

Nachteile:

Sehr zeitaufwendig.
Enthält vieles, was konzeptionell oder mathematisch unsauber ist. Vielzahl an Ansätzen und Einzelüberlegungen verstellt den Blick auf das, was letztlich wichtig ist.

Axiomatische Darstellung (ii):

Nachteile:

Relativ abstrakter Formalismus: z. T. weit entfernt von unmittelbarer physikalischer Anschauung.

Mathematisch voraussetzungsvoll.

Ergebnis vieler Überlegungen wird ohne Motivierung auf einen Schlag präsentiert.

Vorteile:

Die Struktur der Quantentheorie tritt am klarsten zu Tage.

Der Stellenwert verschiedener Aspekte der Quantenmechanik wird besonders deutlich.

Für konzeptionelle/philosophische Überlegungen oft besonders geeignet.

Im Zentrum der für diesen Zweck gegebenen Charakterisierung der Quantentheorie steht ein abstrakter Zustandsbegriff, der jedoch z. B. durch Spin-Experimente motiviert werden kann.

(wird im Folgenden vorausgesetzt)

D.h.: Einführung vor allem vor dem Hintergrund der math. Theorie der Quantenmechanik

Nicht diskutierte Frage:

Verhältnis von Theorie und Experiment

z. B. Bedeutungen von Termen direkt durch Experimente bestimmen?

Zustandsbeschreibung

Fortgeschrittene Theorien der Physik sind so aufgebaut, dass sie mathematische Elemente (in der klassischen Physik meistens Funktionen) enthalten, die den Zustand eines Systems zu einem bestimmten Zeitpunkt festlegen.

Der Zustand eines Systems in der klassischen Physik wird z.B. durch die Angabe aller Orte und Impulse der beteiligten Teilchen festgelegt.

In der Quantentheorie wird der Zustand durch ein mathematisches Objekt charakterisiert, das als *Wellenfunktion*, *Zustandsfunktion* oder *Zustandsvektor* bezeichnet und häufig durch $|\Psi\rangle$ symbolisiert wird. *In einem vereinfachten Modell kann man sich diese Zustandscharakterisierungen als Vektoren (Pfeile in einer Ebene) vorstellen.*

Zustandsbeschreibung in der Quantentheorie

Fortgeschrittene physikalische Theorien enthalten weiter eine Vorschrift, wie sich der Zustand eines Systems *im Laufe der Zeit* ändert.

Dies wird mathematisch durch eine Gleichung ausgedrückt

(„Bewegungsgleichung“), die angibt, wie Zustandsänderungen in Abhängigkeit vom gegenwärtigen Zustand und z.B. von äußeren Kräften berechnet werden können. Man sagt, die Bewegungsgleichung legt die Dynamik fest.

In der Quantentheorie wird diese Zustandsänderung durch die so genannte Schrödinger-Gleichung beschrieben.

Diese Gleichung unterscheidet sich in einigen Eigenschaften von der Bewegungsgleichung der klassischen Mechanik. Weiterhin gilt aber, dass sie deterministisch ist, d.h. wenn ein Zustand gegeben ist, legt die Schrödinger-Gleichung die Zustände für alle folgenden Zeiten fest.

Besonderheit der Zustandsbeschreibung in der QM:

Auch die *vollständige Angabe* des Zustands eines Systems *legt nicht alle Werte* fest, die man bei Messungen an Systemen in diesem Zustand erhalten kann.

Hat ein Objekt z. B. einen definierten Wert des Impulses, dann werden Impulsmessungen immer diesen Wert ergeben, aber Ortsmessungen unterschiedliche Ergebnisse haben („streuen“), deren Auftreten man im Einzelfall aber nicht vorhersagen kann.

Nahe liegende Annahme:

Bei der Messung ändert sich (häufig) der Zustand des Systems.

Es scheint *zwei Dynamiken* zu geben:

- 1. die Schrödinger-Gleichung für die *normalen* zeitlichen Veränderungen und**
- 2. zusätzlich die indeterministischen Veränderungen beim Messprozess.**

Problem: Wann genau tritt 2. statt 1. auf? Was ist ein Messgerät?

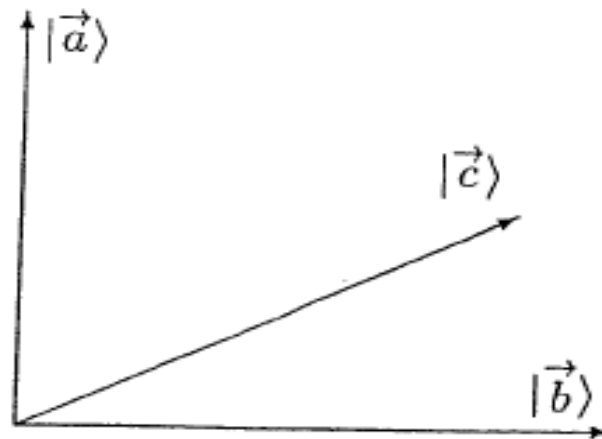
Postulat zur Verknüpfung von Theorie und Experiment

**$|\langle \Psi / \Phi_m \rangle|^2$ ist die Wahrscheinlichkeit, bei der Messung an einem Quantenobjekt im Zustand $|\Psi\rangle$ den Messwert m zu erhalten, der dem Zustand $|\Phi_m\rangle$ zugeordnet ist.
(„Bornsche Regel“)**

Ist z.B. $|\Psi\rangle = |\Phi_m\rangle$, dann ist die Wahrscheinlichkeit, dass der Wert m gemessen wird, gleich 1.

$\langle \Psi / \Phi_m \rangle$ ist das Skalarprodukt im Zustandsraum.

Veranschaulichung



Überlagerungszustände (Superpositionen) der Form
 $|\vec{c}\rangle = c_a|\vec{a}\rangle + c_b|\vec{b}\rangle$

Der Zustand $|c\rangle = c_a|a\rangle + c_b|b\rangle$ geht bei der Messung mit der Wahrscheinlichkeit c_a^2 in den Zustand $|a\rangle$ und mit der Wahrscheinlichkeit c_b^2 in den Zustand $|b\rangle$ über.

Formale Grundstrukturen der Quantenmechanik:

1. Zustände

Jedem phys. Systems (z.B. ein Elektron) wird ein Zustandsraum zugeordnet.

Zustandsraum eines quantenmechanischen Systems: Hilbertraum.

Reiner Zustand: Vektor $|\Psi\rangle$

2. Observablen

Jeder messbaren Größe der klass. Theorie entspricht ein Operator, der auf den Hilbertraum H wirkt.

Die **Spektralwerte** dieses Operators (bei diskretem Spektrum sind das Eigenwerte) sind die möglichen Messwerte a_i im Falle einer Messung der betreffenden Größe: $A |\Psi_i\rangle = a_i |\Psi_i\rangle$

3. Zeitentwicklung der Zustände

Verbindung mit Experiment:

Erwartungswert der Observablen A im Zustand $|\Psi\rangle$: $\langle\Psi|A|\Psi\rangle$

Die formalen Grundstrukturen der Quantenmechanik

Eigenvektor-Eigenwert-Verbindung:

(„eigenvector-eigenvalue link“)

Ist ein System im Eigenzustand der zu messenden Observablen, so liefert eine Messung mit Sicherheit (Wahrscheinlichkeit = 1) den entsprechenden Eigenwert als Messergebnis.

Eine Messung einer Observablen (die Bestimmung einer physikalischen Größe) ergibt immer einen bestimmten Wert (einen Eigenwert der zugehörigen Observablen). Unmittelbar nach der Messung eines Eigenwerts ist das System in dem entsprechenden Eigenzustand.

Messproblem (in der Formulierung von Tim Maudlin)

Folgende drei Aussagen können nicht gleichzeitig wahr sein.

1. Die Zustandsbeschreibung ist vollständig (die Zustandsfunktion/ Wellenfunktion spezifiziert alle physikalischen Eigenschaften eines Systems).
2. Die Zustandsfunktion/ Wellenfunktion entwickelt sich immer gemäß der Schrödinger-Gleichung.
3. Messungen physikalischer Größen (z.B. der Spinkomponente eines Elektrons in einer bestimmten Richtung) haben immer ein definites Ergebnis.

Eine dieser Aussagen muss aufgegeben werden!

*Problem des Messprozesses,
Ausgangspunkt für verschiedene Interpretationen*

2. Interpretationen der Quantentheorie

Phys. Theorie = math. Formalismus + **Interpretation**

Interpretation u. a. auch Abb. des math. Formalismus in die Wirklichkeit, d.h. Angabe, was zumindest einigen Symbolen in Natur oder Experiment entsprechen soll.

In der Quantentheorie gibt es darüber hinaus Interpretationen in einem besonderen Sinn. In der Regel gibt es keine Möglichkeit zwischen verschiedenen Interpretationen experimentell zu entscheiden.

→ *Aufgabe der Metaphysik/ Wissenschaftsphilosophie/
Naturphilosophie*

Verschiedene Stufen der Interpretation

(1) Mathematischer Formalismus

Verschiedene Versionen, aber unumstritten

(2) Minimalinterpretation/ Standardinterpretation

Formalismus wird soweit interpretiert, dass die Theorie testbar wird:

- Bestimmung möglicher Messwerte (Spektren)
- $\langle \Psi | A | \Psi \rangle$ erlaubt die Vorhersage relativer Häufigkeiten und die Auswertung von Streuexperimenten.

In diesem Bereich der Semantik (*Zuordnung von Bedeutung zu den Zeichen der Theorie*) müssen alle Interpretationen übereinstimmen. Die Minimalinterpretation reicht, um mit der Theorie zu arbeiten.

Interpretationen

(3) Ergänzende Festlegungen und Deutungen

Einordnung in das übrige naturphilosophische Wissen.

- Zusammenhang von Messprozess und Zustandsentwicklung
- Einordnung in Raum (Welle-Teilchen-Dualismus)
- Frage nach einem deterministischen Unterbau
- Bedeutung des Zustandsvektors (der Wellenfunktion)

Steht er für ein Einzelobjekt oder für ein Ensemble? Ist der Wahrscheinlichkeitsbegriff subjektiv oder objektiv zu verstehen? Beschreibt die Wellenfunktion einen Zustand der Welt (ontische Interpretation) oder unser Wissen (epistemische I.)?

Lösungsansätze für das Messproblem in der Quantentheorie

Kollapstheorien

Kopenhagen (?)

Ghirardi, Rimini und Weber → stochastische
Schrödingergleichung

***No-collapse*-Theorien**

Bohmsche Quantenmechanik

Everettsche Theorie: Many-Worlds (Viele Welten)-
Interpretation

Dekohärenz (Physik des Messprozesses)

Bohmsche Quantenmechanik

Bewegung eines Teilchens vollst. bestimmt durch:

- seinen Ort,
- die Wellenfunktion,
- die Orte aller anderen Teilchen.

D.h.: Nicht die Wellenfunktion allein beschreibt das System, sondern Wellenfunktion **und** Teilchenorte.

Die Trajektorien der Teilchen sind verborgenen Parameter der Theorie. Es gibt zwei Grundgleichungen:

- (i) Die übliche Schrödingergleichung
- (ii) Bewegungsgleichung („Führungsgleichung“) für die Teilchen.

Viele Welten –Theorie

Eine Version der MWI: Im Falle einer quantenmechanischen Messung spaltet sich das ganze Universum (inkl. des Beobachters) in so viele parallele Welten (*branches*, Zweige) auf, wie es Messergebnisse gibt. In jeder Welt ist ein Messergebnis realisiert.

Nimmt die Tatsache Ernst, dass es in der QM nur eine Zeitentwicklung gibt (die durch die Schrödingerg-Gleichung festgelegte Dynamik).

Für den Messprozess wird *keine zweite, indeterministische Dynamik* angenommen (*deswegen in der Quantenkosmologie populär*).

→ *No collapse*-Theorie.

Postuliert, dass bei einer Messung alle möglichen Ergebnisse vorkommen. („Alles, was passieren kann, passiert auch.“)

Theorien mit Mechanismen für Kollaps

Dekohärenz

Das Dekohärenz-Programm weist einen Weg, wie der Übergang von der Superposition der Form $|c\rangle$ in ein statistisches Gemisch aus Zuständen der Form $|a\rangle$ und $|b\rangle$ verstanden werden kann, genauer in einen Zustand, dessen statistische Beschreibung sich nicht von einem Ensemble aus diesen Zuständen, die einen definierten Wert der zu messenden Größe haben, unterscheidet.

Grundidee: Dieser Übergang ist auf die nie ganz abschirmbare Wechselwirkung eines Quantenobjekts mit seiner Umgebung zurückzuführen.

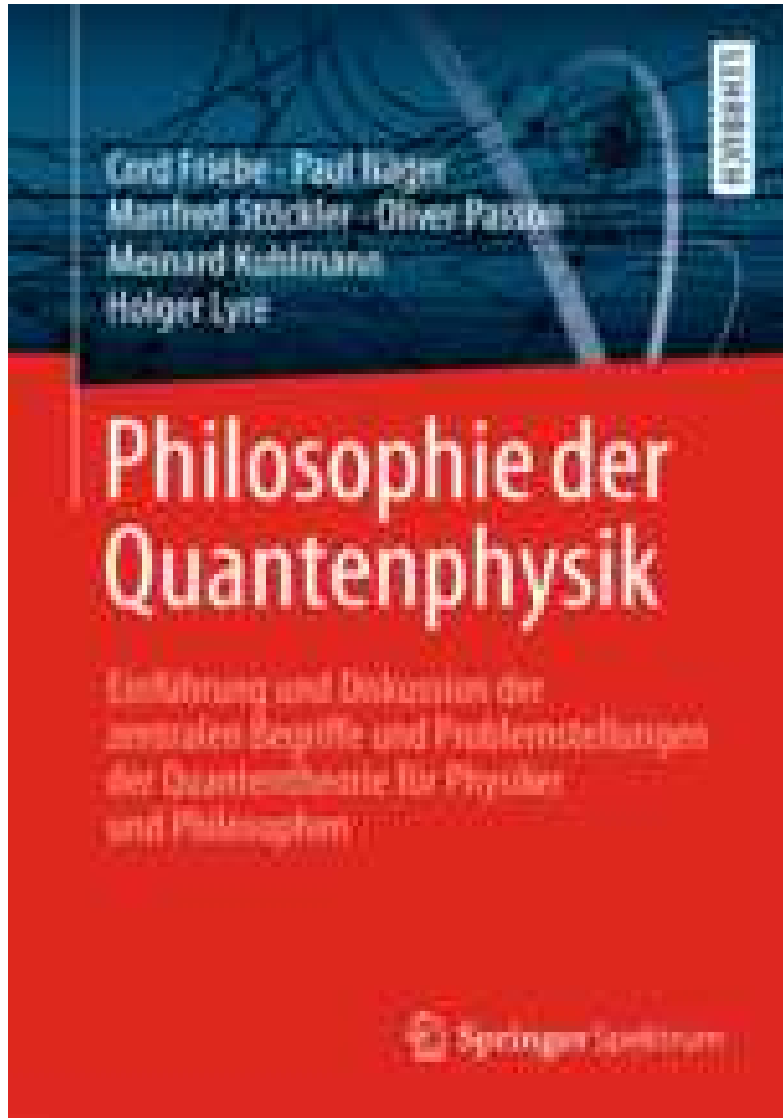
Probleme: *Interferenzen verschwinden nicht ganz. Man braucht zusätzlich z.B. die Viele-Welten- Interpretation. Das Programm ist nicht vollständig ausgearbeitet.*

Theorien mit Mechanismen für Kollaps

GRW-Theorien

Ghirardi, Rimini und Weber (1986)

Ergänzung der Schrödinger-Gleichung um einen stochastischen Term, so dass ein einzelnes mikroskopisches Quantensystem eine (wenn auch sehr geringe) objektive Wahrscheinlichkeit hat, spontan eine seine definierten Ort einzunehmen.



Cord Friebe et al.:
Philosophie der Quantenphysik,
Heidelberg 2014 (Springer)

3. Warum Quantentheorie an der Schule: Ein philosophischer Wunschzettel

Wissen über die Methoden der Naturwissenschaft

Systematischer Aufbau des Wissens

Zusammenhang von Theorie und Erfahrung

Erfahrung einer Naturwissenschaft als dynamischer Prozess

Veränderung von Theorien. Paradigmenwechsel.

Aufgabe von Alltags-Intuitionen und tradierten Denkgewohnheiten.

Differenzierte Fortschrittsvorstellung.

Warum Quantentheorie an der Schule: Ein philosophischer Wunschzettel ...

Metaphysische Voraussetzungen und naturphilosophische Konsequenzen naturwissenschaftlicher Theorien

Einbettung der fundamentalen Quantenobjekte in den Raum
(Grenzen der Feld- und Teilchenvorstellung)

Lokalität

Holismus

Determinismus vs. Indeterminismus

Einheit des Wissens, Strukturen hinter der Mathematik

Literatur (weitere Infos: stoeckl@uni-bremen.de)

Audrechs, Jürgen: Eine andere Wirklichkeit. Zur Struktur der Quantenmechanik und ihrer Interpretation, in: Jürgen Audrechs/ Klaus Mainzer (Hg.): Wieviele Leben hat Schrödingers Katze? Mannheim 1990, S. 15 - 62

Cushing, James T. (1997): Philosophical Concepts in Physics. The Historical Relations Between Philosophy and Scientific Theories, Cambridge 1997(Cambridge University Press), part vii & part viii

Esfeld, Michael (Hrsg.): Philosophie der Physik, Berlin 2012 (stw)

Friebe, Cord et al.: Philosophie der Quantenphysik, Heidelberg 2014 (Springer)

Nortmann, Ulrich: Unschärfe Welt? Was Philosophen über Quantenmechanik wissen möchten, Darmstadt 2008

Stöckler, Manfred (2007): Philosophische Probleme der Quantentheorie, in: Andreas Bartels/ Manfred Stöckler (Hrsg.), Wissenschaftstheorie – Ein Studienbuch, Paderborn 2007, S. 245 – 264

Stanford Encyclopedia of Philosophy (Internet): diverse Beiträge (auch „Probability“) 27