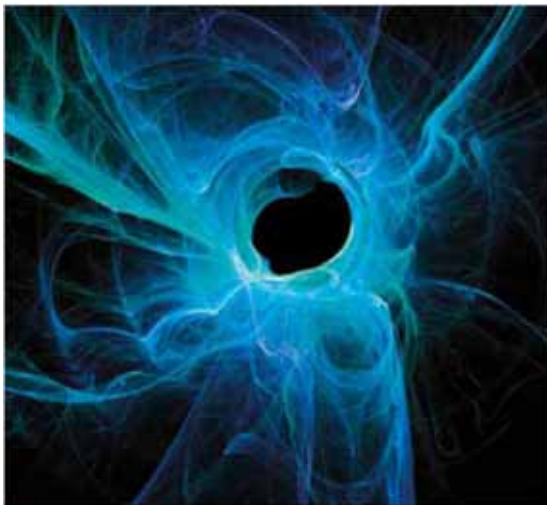


# Revolution mit Hindernissen

## Der steinige Weg von der neuen Physik zu einem neuen Weltbild



Physik-Symposium



„Unbestimmt und relativ? Das Weltbild der modernen Physik“

Nürnberg, 20.-22. September 2019

## Weltbild?

### Einerseits Probleme, die Theorie „zu verstehen“:

*„In my childhood the legend was current, that only twelve men in the world understood Einstein's theory. Nowadays, relativity is quite tame; but I shall argue presently that nobody yet understands the quantum theory.”*

Howard Stein, 1972

### Andererseits beste experimentelle Bestätigung:

*Beispiel: anomales magnetisches Moment des Elektrons*

Theoretische Ableitung  $\mu/\mu_0 = 1,001\,159\,652\,36$  (28)

Experimentelle Überprüfung  $\mu/\mu_0 = 1,001\,159\,652\,209$  (31)

## Überblick

1. Weltbildprobleme?
2. Grundstrukturen der Quantentheorie
3. Interpretationsprobleme
4. Auf dem Weg zu einem Weltbild der Physik

## ***Warum war man mit der klassischen Physik nicht mehr zufrieden?***

### **Neue Erfahrungen und Beobachtungen (um 1900)**

- Thermodynamik elektromagnetischer Felder (Planck)
- Wechselwirkung von Strahlung und Materie (Einstein)
- Atomspektren (Bohr)

### **Methodologische Leitlinien der Theoriebildung**

- Der Wunsch, die Phänomene der Natur durch möglichst einheitliche Naturgesetze zu erklären.
- Das Ziel, bei der Naturbeschreibung möglichst exakte Übereinstimmung mit dem Experiment zu erhalten.

## ***Lange historische Entwicklung (1900 – 1935)***

***Neue Phänomene***



***„Flickschuster“ – Theorieansätze***



***Neuer konsistenter mathematischer Formalismus***



***Neue Konzepte***

## ***Behauptete Weltbildrelevanz:***

Titel eines Buches von Bernhard Bavink (1933): *„Die Naturwissenschaften auf dem Wege zur Religion. Leben und Seele, Gott und Willensfreiheit im Lichte der heutigen Naturwissenschaft.“*

*„Vielleicht wird man aus diesen, der modernen Physik entnommenen Argumenten den Schluss ziehen, dass Religion überhaupt erst seit 1927 für einen vernünftigen Wissenschaftler möglich geworden ist.“*

(A.S. Eddington 1928)

*„Das Weltall fängt an, mehr einem großen Gedanken, als einer großen Maschine zu gleichen.“*  
(J. Jeans 1930)

Probleme, das Selbstverständnis des Menschen als geistiges und handelndes Wesen mit dem mechanistischen Weltbild des 19. Jh. in Einklang zu bringen.

## **Weltbildrelevanz:**

### **WBR 1:**

**Der Indeterminismus der Quantentheorie ermöglicht Willensfreiheit  
(anders als die deterministische klassische Physik).**

*„Der alte oft und gern gegen den Determinismus vorgebrachte Einwand, dass die Willensfreiheit ihm widerspreche, ist jetzt unter dem Schutze des schweren Geschützes der Atomphysik auch von Jordan und Planck wiederholt worden.“*  
(P. Jensen 1934)

*„Die Behauptung des Determinismus, die ‚Verneinung der Willensfreiheit‘, ist also in dem einzigen Sinn, den ihr der Naturwissenschaftler zuschreiben kann, nach dem heutigen Stande unserer Erkenntnis durch die Erfahrungen der Physiologie einerseits und der Atomphysik andererseits widerlegt.“*  
(P. Jordan 1932)

**WBR 2:**

**Im Unterschied zur mechanistischen Physik des 19. Jahrhundert spielt das Bewusstsein des Menschen in der Quantentheorie eine zentrale Rolle**

**Version 1: *Der Messprozess in der Quantentheorie ist nur durch den direkten Eingriff des menschlichen Geistes verständlich.***

*Es ist „nicht möglich, die Gesetze der Quantenmechanik völlig konsistent zu formulieren, ohne auf das Bewusstsein Bezug zu nehmen“ (E. Wigner 1967)*

**Version 2: Bestimmte Theorien mit verborgenen Parametern sind ausgeschlossen.**

*„Die Auffassung, dass die Welt aus Objekten besteht, deren Existenz unabhängig vom menschlichen Bewusstsein ist, erweist sich als unvereinbar mit der Quantenmechanik und mit Fakten, die experimentell bestätigt sind.“*

*(B. d'Espagnat, Scientific American Nov. 1979)*



## ***Weltbildrelevanz:***

### **WBR 3: Die Quantenmechanik widerspricht dem Realismus**

Die Physik redet nicht über eine objektive, von der Beobachtung unabhängige Realität. Die Quantenmechanik ist eine Wissenschaft von der Natur, wie diese sich uns zeigt, wenn sie mit bestimmten Beobachtungsverfahren untersucht wird. (Vgl. Kopenhagener Interpretation, P. Mittelstaedt, Franz v. Kutschera)

*Intuition oft: Messung „stört“ das System auf nicht herausrechenbare Weise, Quantenmechanik bezieht sich Quantensysteme in Wechselwirkung mit makroskopischen Geräten.*

*Die Quantenmechanik ist eine Physik, „die gar nicht mehr realistisch gedeutet werden kann.“ (C.F. von Weizsäcker 1963)*

**WBR 4: Die Quantentheorie verwendet neue Vorstellungen der Einbettung von Objekten in den Raum (u.a. eine gewisse Form des Holismus)**

**Insbesondere bei zusammengesetzten Systemen: Verletzung von bisher akzeptierten Prinzipien der Lokalität und Separabilität.**

*Anschaulich:*

Lokalität: Fernwirkungen sind ausgeschlossen.

Separabilität: Getrennte Objekte können als eigenständige Objekte beschrieben werden.

Holismus: Der Gesamtzustand ist nicht durch die Zustände der Komponenten festgelegt.

## ***Diskussion von Weltbildrelevanz:***

Zunächst vor allem bei Physikern

*„... welcher Physiker hatte schließlich in jener Periode Muße dafür, die Schriften von Philosophen zu lesen, die mit größter Wahrscheinlichkeit ohnehin die Physiker doch nur missverstanden hatten.“ (H. Margenau 1957)*

Seit den 1960er Jahren:

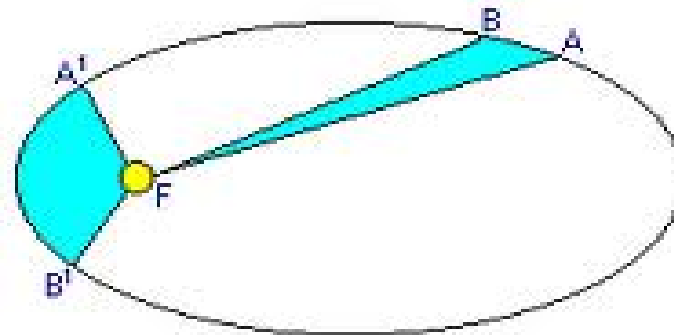
Professionalisierung im Rahmen einer Philosophie der Physik, die sich insbesondere um die Interpretation der Quantentheorie und damit um die Brücke vom mathematischen Formalismus der Quantentheorie zu allgemeinen philosophischen Fragen kümmert.

## 2. Grundstrukturen der Quantentheorie

### Zustandsbeschreibung

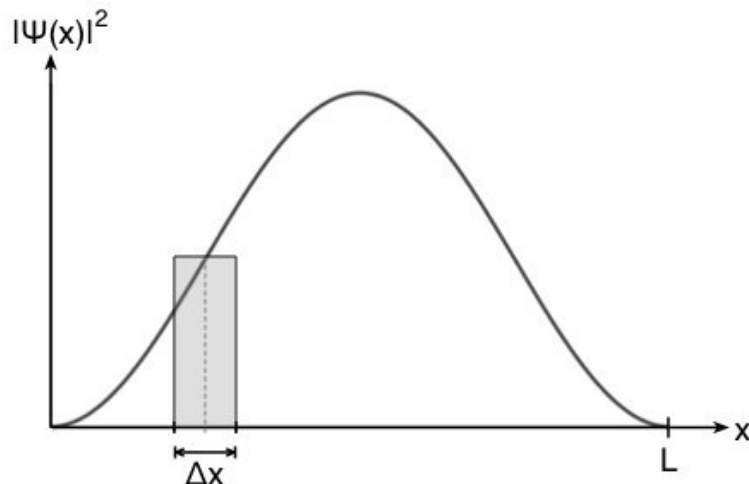
Fortgeschrittene Theorien der Physik sind so aufgebaut, dass sie mathematische Elemente (in der klassischen Physik meistens Funktionen) enthalten, die den Zustand eines Systems zu einem bestimmten Zeitpunkt festlegen. Der Zustand bestimmt die Eigenschaften.

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



*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.*



*anschaulicher Spezialfall: Frage nach Wahrscheinlichkeit, ein Elektron an einem bestimmten Ort zu finden.*

## 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 (das zeigt ihre mathematische Struktur).*

## 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 werden unterschiedliche Ergebnisse haben („streuen“), deren Auftreten man im Einzelfall aber nicht vorhersagen kann.*

### *Feinheiten:*

In der Quantentheorie werden physikalischen Größen wie Ort und Impuls („Observablen“) sog. Operatoren  $A$  zugeordnet, die auf Zustandsvektoren wirken.

Für die Zustände, die sich bei der Messung dieser Größe nicht ändern („Eigenzustände“) gilt folgende Gleichung:

$$A |\Phi_m\rangle = m |\Phi_m\rangle \quad (\text{und } m \text{ ist der gemessene Wert})$$

*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.**

Der gleiche Zustand eines Quantensystems muss sich bei der Messung bestimmter Größen ändern, bei der Messung anderer Größen wird er gleich bleiben (wenn er Eigenzustand zu dem zugehörigen Operator ist).



## **Besonderheit der Zustandsbeschreibung in der QM:**

**Es scheint *zwei Dynamiken* zu geben (J. von Neumann):**

- 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?

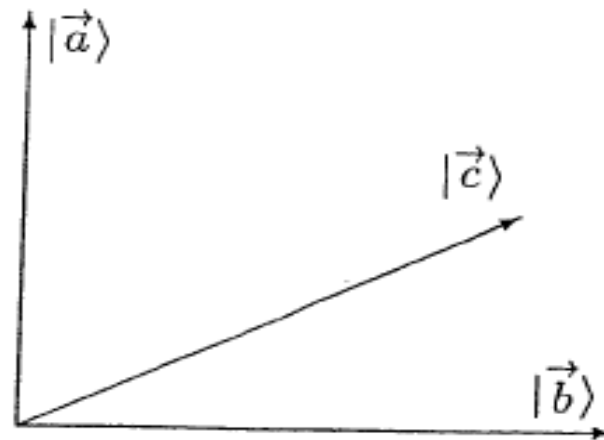
## *Postulat zur Verknüpfung von Theorie und Experiment*

$|\langle \Psi | \Phi_m \rangle|^2$  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.

Details: Was ist *unscharf* in der Quantentheorie?

Man kann zeigen, dass die Operatoren, die den Observablen Ort und Impuls (Geschwindigkeit x Masse) zugeordnet sind, nicht vertauschen ( $AB$  ist verschieden von  $BA$ ), d.h. es kommt auf die Reihenfolge der Messung an. Deshalb kann es aus mathematischen Gründen keine Zustände  $|\Psi\rangle$  geben, die zugleich Eigenzustände des Ortsoperators und des Impulsoperators sind.

Es gibt also keine quantenmechanischen Zustände, die sich weder bei einer Ortsmessung noch bei einer Impulsmessung ändern.

Es ist also nicht möglich, Quantenobjekten zugleich einen definierten („scharfen“) Ort *und* einen definierten („scharfen“) Impuls zuzusprechen.

*Es ist nicht nur unmöglich, solche Zustände zu messen, es ist auch unmöglich, Zustände mit scharfem Ort und scharfem Impuls im mathematischen Formalismus zu finden.*

Folgerung: Quantenobjekte sind keine klassischen Teilchen.

## *Heisenbergsche Unschärferelation (eine Variante)*

Die Heisenbergsche Unschärferelation gibt dazu eine quantitative Beziehung an.

Sie sagt qualitativ aus, dass in einem Zustand mit kleiner Streuung der Werte einer Ortsmessung die Werte einer Impulsmessung stark streuen (und umgekehrt):

$$\Delta x \Delta p_x \geq h/4\pi$$



*Die Größe  $\langle \Psi | A | \Psi \rangle$  ist der Erwartungswert (Mittelwert einer langen Messreihe) der Observablen  $A$  in einem System mit dem Zustand  $|\Psi\rangle$ .*

*$\Delta A$  ist die Wurzel aus dem Erwartungswert der Quadrate der Abweichung der Messwerte von dem Erwartungswert (also eine Streuung im Sinne der Statistik).*

Auch aus den Heisenbergschen Unschärferelationen kann man schließen, dass Quantenobjekte keine klassischen Teilchen sind, die auf Bahnen laufen (wenn man keine plausible Erklärung für die Streuung hat).

Weitere Besonderheiten:

(i) Superposition und Vorliegen von Eigenschaften

$$|\Psi\rangle = c_n |a_n\rangle + c_m |a_m\rangle \quad (\text{mögliche gemessene Werte: } n \text{ oder } m)$$

(ii) Superpositionen und Beschreibung zusammengesetzter Systeme

$$|\Psi\rangle = c_n |a_n\rangle |A_n\rangle + c_m |a_m\rangle |A_m\rangle$$

Die Wellenfunktion eines zusammengesetzten Systems ordnet den Komponenten keinen ‚eigenen‘ Zustand zu (wie in  $|\Psi_1\rangle |\Phi_2\rangle$ ).

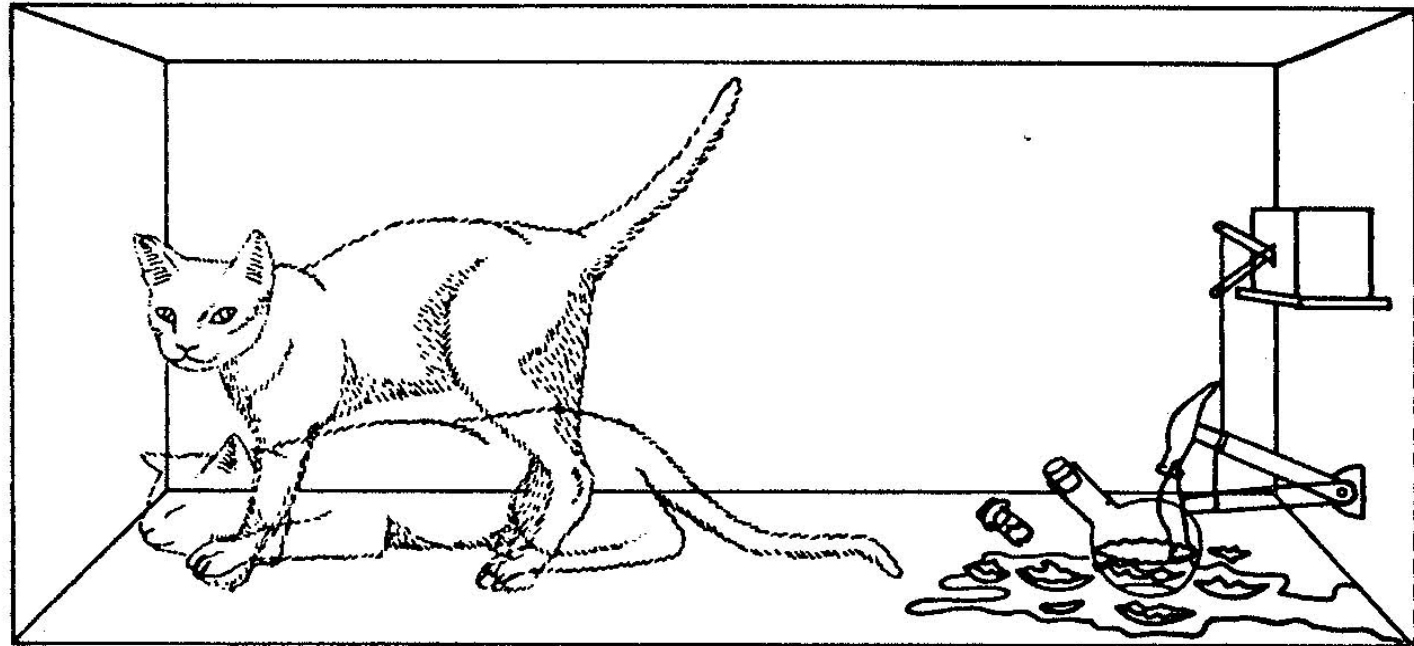
*In welchem Sinn kann man dann noch von „Teilsystemen“ sprechen?*

**Beispiel 1:** *Theorie des Messprozesses von John von Neumann (1932)*

*[System + Messgerät]*

$$|\Psi\rangle = c_n |a_n\rangle |A_n\rangle + c_m |a_m\rangle |A_m\rangle$$

## Beispiel 2: Schrödingers Katze



$|\Psi\rangle = c_n |a_n\rangle + c_m |a_m\rangle$  Atomkernzustand (Superposition von nicht  
zerfallen und zerfallen)

$|\Psi\rangle = c_n |a_n\rangle |A_n\rangle + c_m |a_m\rangle |A_m\rangle$

$|A_n\rangle$ : Zustand Katze lebt .  $|A_m\rangle$ : Zustand Katze tot.

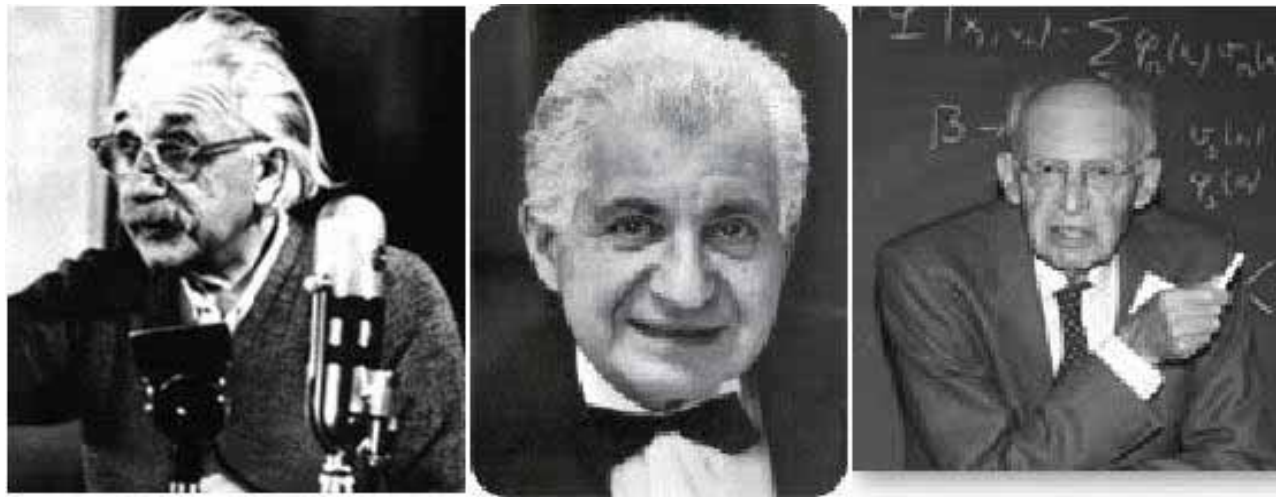
## Beispiel 2: EPR Paradoxon

Einstein, A./ Podolsky, B./ Rosen, N.:

Can Quantum-Mechanical Description be Considered Complete?

*Physical Review 47 (1935)*

Kann man die quantenmechanische Beschreibung der physikalischen  
Wirklichkeit als vollständig betrachten?





Einstein wollte die Unvollständigkeit der Quantentheorie zeigen.

# Ein spezielles Beispiel zeigt:

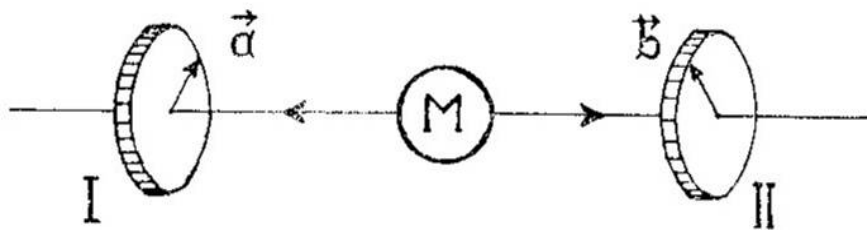
*Man kann Ort und Impuls eines Teilchens vorhersagen, ohne das System zu stören. Die daraus gefolgerte gleichzeitige Realität von Ort und Impuls hat aber in der Quantenmechanik kein Gegenstück.*

*Das spezielle System:*

Zwei in entgegengesetzter Richtung auseinander fliegende Teilchen, bei denen durch Messung der einen Komponente  $S_1$  das Ergebnis an der Komponente  $S_2$  errechnet und damit indirekt bestimmt werden kann.

*Unabsichtlich haben die Autoren dabei die Nichtlokalität der Quantentheorie ans Tageslicht gebracht.*

*Mit dem Spin-Beispiel von Bohm (1951):*

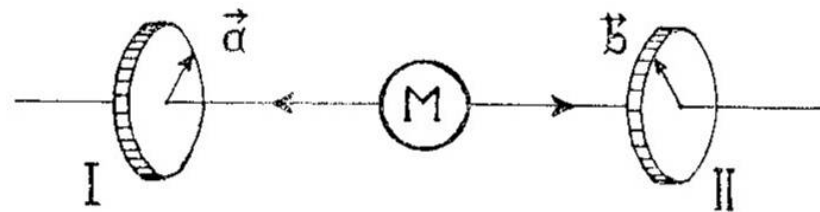


Die Wellenfunktion des zusammengesetzten Systems ordnet den Komponenten keinen ‚eigenen‘ Zustand zu:

$$|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} |a_I \uparrow\rangle |a_{II} \downarrow\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}} |a_I \downarrow\rangle |a_{II} \uparrow\rangle,$$

$$|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} |b_I \uparrow\rangle |b_{II} \downarrow\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}} |b_I \downarrow\rangle |b_{II} \uparrow\rangle,$$

*(Zustandsvektor ist kein Produkt)*



$$|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} |a_I \uparrow\rangle |a_{II} \downarrow\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}} |a_I \downarrow\rangle |a_{II} \uparrow\rangle,$$

$$|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} |b_I \uparrow\rangle |b_{II} \downarrow\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}} |b_I \downarrow\rangle |b_{II} \uparrow\rangle,$$

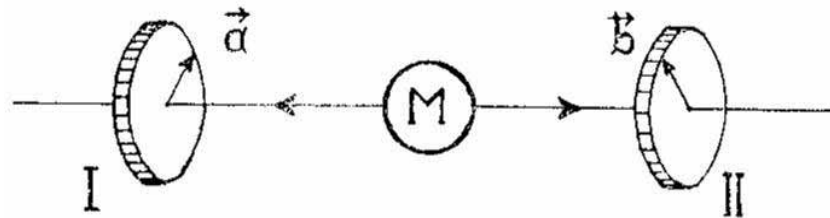
Der Messprozess ergibt (indeterministisch) gemäß der Quantentheorie

$$|a_I \uparrow\rangle |a_{II} \downarrow\rangle \quad \text{oder} \quad |a_I \downarrow\rangle |a_{II} \uparrow\rangle$$

(also Messwerte für die Teilsysteme) bzw. bei anderer Wahl der Messrichtung

$$|b_I \uparrow\rangle |b_{II} \downarrow\rangle \quad \text{oder} \quad |b_I \downarrow\rangle |b_{II} \uparrow\rangle.$$

*„Da ... die beiden Systeme zum Zeitpunkt der Messung nicht mehr miteinander in Wechselwirkung stehen, kann nicht wirklich eine Änderung in dem zweiten System als Folge von irgendetwas auftreten, das dem ersten System zugefügt werden kann.“*



*Die Wellenfunktion des zusammengesetzten Systems ordnet den Komponenten keinen ‚eigenen‘ Zustand zu:*

$$|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} |a_I \uparrow\rangle |a_{II} \downarrow\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}} |a_I \downarrow\rangle |a_{II} \uparrow\rangle,$$

$$|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} |b_I \uparrow\rangle |b_{II} \downarrow\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}} |b_I \downarrow\rangle |b_{II} \uparrow\rangle,$$

*(Zustandsvektor ist kein Produkt)*

Verschränkte Systeme (entanglement):

*„ ... **der** charakteristische Zug der Quantentheorie, der ihre völlige Abweichung von der klassischen Denkweise erzwingt. “*

E. Schrödinger

Maximale Kenntnis des Gesamtsystems schließt nicht maximale Kenntnis der Teilsysteme ein.

Nach der Messung liegen aber für beide Teilsysteme Messwerte vor (z.B. Spin-up oder Spin-down). *Dabei weisen verschränkte Systeme auch im Fall großer räumlicher Trennung Korrelationen auf, die weder durch eine Wechselwirkung noch durch eine gemeinsame Ursache erklärbar sind.*

Es liegt so etwas wie ein gekoppelter Messprozess vor, eine „ferngesteuerte“ korrelierte Reduktion des Zustandvektors.

*Da zu den Prämissen des EPR-Arguments eine Lokalitätsannahme gehört, von der man mittlerweile weiß, dass sie nicht mit gemessenen Korrelationen verträglich ist, kann das Argument nicht als stichhaltig betrachtet werden.*

### 3. Interpretationsprobleme

Physikalische Theorie = mathematischer Formalismus + **Interpretation**

*Interpretation u. a. auch Abbildung des mathematischen Formalismus in die Wirklichkeit, d.h. Angabe, was zumindest einigen Symbolen in der Natur bzw. im Experiment entsprechen soll.*

In der Quantentheorie gibt es darüber hinaus Interpretationen in einem besonderen Sinn. Meist 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.

*Eine instrumentalistische Theorieauffassung kann sich damit zufrieden geben.*

Interpretationen im engeren Sinn:

### **(3) Ergänzende Festlegungen und Deutungen**

*Einordnung in das übrige naturphilosophische Wissen.*

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



## Ergänzende Festlegungen und Deutungen

- Bedeutung des Zustandsvektors (der Wellenfunktion)

*Steht er für ein **Einzelobjekt** oder für ein **Ensemble**?*

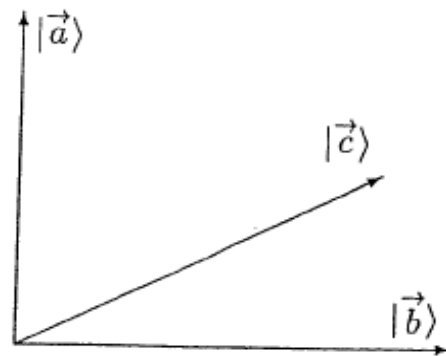
*Ist der Wahrscheinlichkeitsbegriff **subjektiv** oder **objektiv** zu verstehen?*

*Beschreibt die Wellenfunktion einen Zustand der **Welt** (ontische Interpretation) oder unser **Wissen** (epistemische Interpretation)?*

*Gibt die Zustandsfunktion nur an, mit welchen Wahrscheinlichkeiten spezielle Messwerte auftreten, wenn auf Quantenobjekte bestimmte Messverfahren angewandt werden (**relationale Zustandskonzeption**)?*

## *Probleme des Messprozesses*

Annahme: Der Zustand  $|c\rangle = c_a |a\rangle + c_b |b\rangle$  geht bei der Messung tatsächlich mit der Wahrscheinlichkeit  $c_a^2$  in den Zustand  $|a\rangle$  und mit der Wahrscheinlichkeit  $c_b^2$  in den Zustand  $|b\rangle$  über, ohne dass dieser Prozess durch die Schrödinger-Gleichung beschrieben werden kann.



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

*Dann wäre die Zustandsänderung bei der Messung indeterministisch, und damit auch die Quantentheorie. Aber wann ist eine Zustandsänderung ein Messvorgang?*

## Verschiedene Theorien des Messprozesses

### Kollapstheorien

Zustand ändert sich instantan bei der Messung (*von Neumann, 2. Dynamik*)

GRW (Ghirardi, Rimini und Weber) → stochastische Schrödinger-Gleichung  
(*Veränderung der Theorie*)

### No-collapse-Theorien

Bohmsche Quantenmechanik (Wellenfunktion + Teilchenorte)

Everettsche Theorie: Many-Worlds (Viele Welten)-Interpretation  
(*Alles, was geschehen kann, geschieht auch*)

Dekohärenz (Physik des Messprozesses)

Programm: *Zustandsveränderung ist auf die nie ganz abschirmbare Wechselwirkung eines Quantenobjekts mit seiner Umgebung zurückzuführen.*

Bei Messung ändert sich nur unser Wissen. (*Epistemische Deutung*)

## 4. Auf dem Weg zu einem Weltbild der Physik

Philosophische Folgerungen aus der Quantentheorie gibt es nur mit zusätzlichen Interpretationsannahmen, die z.T. selbst philosophische Quellen haben.

*Erneuter Blick auf weltbildrelevante Behauptungen:*

### **WBR 1: Der Indeterminismus der Quantentheorie ermöglicht Willensfreiheit.**

Ist die Quantentheorie indeterministisch? *Antwort ist interpretationsabhängig.*

Die Antwort ist aber auch irrelevant für die Freiheitsfrage. Freiheit im philosophischen Sinn ist mit deterministischen physikalischen Theorien vereinbar.

**WBR 2: Im Unterschied zur mechanistischen Physik des 19. Jahrhunderts spielt das Bewusstsein des Menschen in der Quantentheorie eine zentrale Rolle.**

***Version 1: Messprozess in der Quantentheorie ist am besten durch Eingriff des menschlichen Geistes im Sinne einer Körper-Geist-Interaktion verständlich zu machen.***

Entscheidend ist Messgerät, nicht Bewusstsein (Bornsche Regel beim Eingriff des Geistes?)

*London und Bauer: Körper-Geist-Interaktion aus Philosophie importiert.*

***Version 2: Bestimmte Theorien mit verborgenen Parametern sind ausgeschlossen.***

Anhänger von Theorien mit verborgenen Parametern und sog. „*lokalrealistische Theorien*“ waren oft Realisten. Solche Theorien können die EPR-Korrelationen nicht erklären, weil sie *lokal* sind. Das heißt nicht, dass andere erfolgreichere Theorien nicht realistisch interpretiert werden könnten (oder dass sie sich auf das Bewusstsein berufen müssten).

## WBR 3: Die Quantenmechanik widerspricht dem Realismus

### Verschiedene Strategien

- (i) Lokal-realistische Theorien können EPR-Korrelationen nicht reproduzieren (s.o.).

*Realisten sind nicht auf lokal-realistische Theorien festgelegt.  
(Missverständnis im Hinblick auf Einstein.)*

- (ii) Spezielles Verständnis von Realismus: **Alle** Observablen müssen in **allen** Zuständen einen definierten Wert haben (*speziell auch verborgene Parameter*).

*Realismus erfordert keine klassische Ontologie .*



(iii) Relationale Auffassung:

Die Quantenmechanik ist die Wissenschaft von der Natur, wie sie sich uns zeigt, wenn sie mit bestimmten Beobachtungsverfahren untersucht wird.

*Messprozess bleibt im Nebel.*

*Einschränkung des Geltungsbereichs zeigt sich nicht im Formalismus der Quantentheorie.*

*Zusammenhang von Mikro- und Makrowelt?*

*Heuristisch: Beruhigungsphilosophie?*

**Fazit:**

**Es gibt keine speziell quantenmechanischen Gründe gegen Realismus.**

*Viele Formen des Realismus. In einer realistischen Interpretation der QTh repräsentiert die Zustandsfunktion ein in einer denkunabhängigen Realität existierendes physisches Objekt, im Gegensatz zu antirealistischen oder instrumentalistischen Interpretationen, in der sie lediglich ein Recheninstrument darstellt.*



## **WBR 4: Die Quantentheorie verwendet neue Vorstellungen der Einbettung von Objekten in den Raum (u.a. eine gewisse Form des Holismus)**

Interpretationsprobleme der Quantentheorie: Unterschiedliche Vorstellungen der Einbettung von Quantenobjekten in den Raum  
*(Nachfolgeproblem des Dualismus von Teilchen und Welle)*

*(Raumzeitliche Interpretation für Verknüpfung mit Experiment ist allerdings unproblematisch.)*

Diskussion um Interpretation der Quantenfeldtheorie (vgl. Kuhlmann in Friebe et al. (2018), Kap. 6)

*Problem für Vereinigung mit Relativitätstheorie*



*Einstein und Mitarbeiter wollten zeigen, dass die QM unvollständig ist. Sie haben dabei ein neues Problem sichtbar gemacht, das Einsteins Intuitionen noch mehr zuwider läuft als die Anerkennung der Vollständigkeit, die **Nicht-Lokalität** der Quantenmechanik.*

Frage:

*Kann die Quantenmechanik durch die Einführung verborgener Parameter wieder zu einer lokalen und deterministischen Theorie gemacht werden?*



*John S. Bell*

Bellscher Beweis 1994:

***Keine** Theorie mit verborgenen Parametern kann, wenn sie die **Vorhersagen der QTh wiedergibt, lokal** in dem Sinne sein, dass die Messung an einem System nicht beeinflusst wird vom Messverfahren an dem anderen weit entfernten System.*

Argument bei Bell und in Folgeuntersuchungen ist allgemein: *Es nimmt nur auf **Korrelationen von Messergebnissen** Bezug, es gilt also für eine ganze Klasse von Theorien.*

*Man kann mit relativ einfachen Mitteln zeigen, dass von einer Reihe plausibler Annahmen (Prinzipien der Theoriebildung) mindestens eine aufgegeben werden muss.*

*Zu diesen Annahmen gehören:*

# Korrelationen sollten erklärt werden  
*(methodologisch)*

# Separabilität (unabhängige Existenz von  
räumlich distanten Dingen)      *(metaphysisch)*

# spezielle Relativitätstheorie      *(physikalisch)*

Die Diskussionen haben noch nicht zu einem allgemein akzeptierten und leicht einsehbaren Ergebnis geführt.

*Details bei P. Näger in Friebe et al. 2018, Kap. 4*



*Anschaulich:*

Ergebnisse der Messung an einem Teilsystem hängen statistisch von der Wahl der Messrichtung an dem anderen Teilsystem ab, auch wenn die Festlegung der Messrichtung so erfolgt ist, dass darüber kein Signal mehr am andern System ankommt.

Die Tatsache, dass die Quantenmechanik die Korrelationen korrekt wiedergibt, löst das Problem nicht.

*Mechanismus der Messung? Raumzeitlicher Vorgang?  
Vereinbarkeit mit Relativitätstheorie?*

Wie kommen die Korrelationen zustande?

*„The answer, being disappointing perhaps, is that quantum mechanics can say nothing about it.“*

Günther Ludwig, 1971

***Nicht-Lokalität/ Nicht-Separabilität als Grundzug der Natur?***

## Skeptische Überlegungen

- 1) Folgen für das alltägliche physikalische Weltbild sind gering.  
*Grenzübergang von QTh zur klassischen Physik ist schwierig, aber interessant. Relevanz evtl. für Quantengravitation.*
- 2) Die beste Theorie, die erreichbar ist, könnte nur pragmatisch akzeptabel sein (Vorläufigkeit physikalischer Theorien)

*„Wir können uns glücklich schätzen, wenn es uns gelingt, die Unschärferelationen und den Indeterminismus der gegenwärtigen Quantenmechanik in einer Weise zu beschreiben, die für unsere philosophischen Überlegungen befriedigend ist. Wenn uns dies aber nicht gelingt, dann sollten wir deswegen nicht allzu beunruhigt sein. Wir dürfen einfach nicht vergessen, dass wir uns in einem Übergangsstadium [der Physik] befinden, und dass es vielleicht ganz unmöglich ist, in diesem Stadium ein befriedigendes Bild zu erhalten.“*

P.A.M. Dirac, *Scientific American* Mai 1963

**Literatur** (weitere Infos, auch zu den Zitaten: [stoeckl@uni-bremen.de](mailto:stoeckl@uni-bremen.de))

*Friebe, C., M. Kuhlmann, H. Lyre, P. Näger, O. Passon, M. Stöckler*: Philosophie der Quantenphysik, 2. Auflage, Heidelberg 2018 (Springer)

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

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

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

*Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Internet-Quelle): diverse Beiträge (z. B. auch zu EPR, Heisenbergs Unschärferelationen, Quantenfeldtheorie, Wahrscheinlichkeitsbegriffen)