

Quanten-Glossar

Axiome der Quantenmechanik

für reine Zustände im Schrödinger-Bild der nichtrelativistischen QM:

- A1: Ein Quantensystem ist assoziiert mit einem Hilbertraum und sein Zustand zur Zeit t ist repräsentiert durch einen Vektor $\Psi(t)$ im Hilbertraum (siehe *Zustand*).
- A2: Eine physikalische Grösse A wird repräsentiert durch einen *linearen Operator* A im Hilbertraum. Die Werte a von A werden durch die Zahlen im Spektrum von A dargestellt: $A\Psi = a\Psi$ (Schwabl 1988, S. 31).
- A3: Zeitentwicklung von $\Psi(t)$: Wenn $\Psi(t_0)$ der Zustand des Quantensystems zur Zeit t_0 ist, dann ist der Zustand $\Psi(t)$ für alle Zeiten t gegeben durch $\Psi(t) = U(t) \Psi(t_0)$, wobei $U(t) = \exp\{-iH(t - t_0)\}$ und H der Hamilton-Operator ist, d.h. ein Operator im Hilbertraum, der die Gesamtenergie des Systems repräsentiert.
- A4: Bornsche Regel (siehe dort)
- A5: Projektionspostulat (siehe dort)
(Held 2012, S. 75).

A3': Die Zeitentwicklung der Zustände wird durch die Schrödingergleichung bestimmt:

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi = H\Psi \quad , \quad H = -\frac{\hbar^2}{2m} \vec{\nabla}^2 + V(\vec{x})$$

A4': Der Erwartungswert bzw. Mittelwert des Operators A im Zustand Ψ ist $\langle A \rangle = (\Psi, A\Psi)$ (siehe auch *Erwartungswert*, Schwabl 1988, S. 37 und 149).

Bells Theorem (John Bell, 1964):

Das Bellsche Theorem schliesst die Möglichkeit von LHV-Theorien („Local Hidden Variables“) aus. Davon nicht betroffen ist die Bohmsche Mechanik von 1951, welche eine nichtlokale Theorie mit verborgenen Variablen ist.

Die Bellsche Ungleichung setzt hypothetisch eine LHV-Theorie voraus und wird durch die Quantenmechanik und die Bohmsche Mechanik verletzt.

Bohmsche Mechanik

1951 hat David Bohm eine Mechanik entwickelt, die den Formalismus der Quantenmechanik beibehält. Die Bohmsche Mechanik ist aber deterministisch und beruht auf dem Postulat einer objektiven Realität. Die ontologischen („verborgenen“) Variablen sind scharf bestimmte Orte von Punktteilchen und deren Bahnen im physikalischen Raum. Die Wellenfunktion spielt die Rolle eines Führungsfeldes dieser Teilchen¹. In der Bohmschen Mechanik gibt es weder einen Kollaps der Zustandsfunktion noch ein Messproblem (Bohm 1952, Dürr und Lazarovici 2012).

Bornsche Regel

Wenn ein Quantensystem im Zustand $\Psi(t)$ ist, A eine Observable mit einem Wert a und Ψ_a ein Zustand, für den $A\Psi_a = a\Psi_a$ gilt, dann ist die Wahrscheinlichkeit $P(a)$

¹ Die Idee des Führungsfeldes geht auf Prince Louis de Broglie zurück.

dafür, dass A den Wert a hat, gegeben durch $P(a) = |\Psi(t)\Psi_a|^2$ (Held 2012, S. 72-75).

Der Wissenschaftsphilosoph Carsten Held vermeidet es bewusst, bei der Bornschen Regel von „Messung“ zu sprechen im Sinne: $P(a)$ sei die Wahrscheinlichkeit dafür, dass der Wert a gemessen werde.

Dekohärenz

- Dekohärenz (Heinz-Dieter Zeh, 1970) erklärt, warum Quantensysteme klassisch erscheinen können. Die klassischen Eigenschaften beruhen auf unvermeidlichen und irreversiblen Wechselwirkungen mit der Umgebung (Kiefer, 2012, S. 272).
- Durch den fortschreitenden Prozess der Zustandsverschränkung verliert ein Quantensystem bei der Wechselwirkung mit einer makroskopischen Umgebung seine Interferenzfähigkeit. Somit ist z.B. die experimentelle Realisierung der Überlagerung von «toter Katze» und «lebendiger Katze» praktisch unmöglich. (Dürr und Lazarovici 2012, S.119, siehe auch: *Kohärenz, Verschränkung und Superposition*).
- Wegen der extrem kurzen Kohärenzlängen und Kohärenzzeiten bei Wechselwirkungen mit makroskopischen Systemen (z.B. mit Messgeräten oder nur schon Staubkörnern), sehen die Effekte der Dekohärenz wie ein Kollaps der Wellenfunktion aus (Joos 2002, S. 180f. & 194).

Ensembleerfahrung

Die Intensitätsverteilung der Beugung am Spalt (oder am Doppelspalt) lässt sich auf drei ganz verschiedene Weisen realisieren:

1. Man kann zu einer bestimmten Anordnung von Spalt und Schirm einen dichten Strom von Elektronen oder Photonen durch den Spalt schicken, sodass viele Teilchen gleichzeitig auf dem Schirm auftreffen.
2. Man kann aber auch den Strom so verdünnen, dass sich immer nur einzelne Teilchen nacheinander in der Anlage befinden.
3. Man kann schliesslich in grosser Zahl die gleiche experimentelle Anlage bestehend aus Quelle, Spalt und Schirm aufbauen, durch jede dieser Anlagen nur genau ein Teilchen schicken und die dabei auf den vielen Platten erzielten Einzelaufschläge in ein einzelnes Bild eintragen (Audretsch, 2002, S. 7).

EPR-Korrelation

- Der Begriff „EPR-Korrelation“ geht auf das Gedankenexperiment in der Publikation von Einstein, Podolsky und Rosen (1935) zurück.
- Die Korrelationen der Zustandsverschränkung sind unabhängig vom räumlichen Abstand der betroffenen Systeme. Es werden z.B. zwei Elektronen von einer Quelle im Singulett-Zustand (siehe dort) emittiert (Präparation). In keiner der drei Raumrichtungen hat der Spin der Elektronen einen bestimmten Wert. Aber es bestehen folgende Korrelationen: Wenn das eine System den definiten Wert *Spin plus* in einer der drei Raumrichtungen erwirbt, dann erwirbt das andere System den Wert *Spin minus* in derselben Raumrichtung – oder umgekehrt, wie gross auch der räumliche Abstand zwischen den beiden Systemen sein mag (Esfeld 2012, S. 91, siehe auch *Verschränkung und Nichtlokalität*).
- Ein Zustandsvektor eines zusammengesetzten Systems heisst EPR-korreliert, wenn er sich *nicht* als Produktevektor darstellen lässt: $\Psi \neq \Psi_A \Psi_B$

Erwartungswert

Der Erwartungswert bzw. Mittelwert der Observablen A im Zustand Ψ ist für reine und gemischte Zustände $\langle A \rangle = (\Psi, A\Psi)$.

Für reine Zustände mit einem diskreten Spektrum von Eigenwerten a_1, a_2, \dots gelten die Eigenzustand-Eigenwert-Gleichung $A\Psi_i = a_i\Psi_i$ und:

$\Psi = \sum_i c_i \Psi_i$ mit $|c_i|^2 =$ Wahrscheinlichkeit, den Eigenwert a_i zu messen.

$$\langle A \rangle = (\Psi, A\Psi) = \left(\sum_i c_i \Psi_i, A \sum_k c_k \Psi_k \right) = \left(\sum_i \sum_k c_i^* c_k (\Psi_i, A\Psi_k) \right) = \sum_i \sum_k c_i^* c_k a_k (\Psi_i, \Psi_k)$$

Orthonormierung: $(\Psi_i, \Psi_k) = \delta_{ik} \Rightarrow \langle A \rangle = \sum_k |c_k|^2 a_k$

Experiment

Ein typisches Quantenexperiment verläuft typischerweise in drei Phasen – gezeigt am Beispiel des einfachsten Beugungsexperiments:

1. Es beginnt zur Zeit t_0 mit der Präparation des Zustandes $\Psi(t_0)$ – vor dem Spalt, z.B. Beschleunigung von Kathodenstrahlen (siehe *Präparation*).
2. Es folgt die deterministische dynamische Entwicklung des Quantenzustandes $\Psi(t)$ in der Apparatur – zwischen Spalt und Schirm (siehe *Zeitentwicklung*).
3. Schliesslich erfolgt die Messung – die Aufschläge auf dem Schirm (siehe *Projektionspostulat* und *Kollaps*, Audretsch 2002, S. 11).

Individualität

- Individuelle Objekte haben eine intrinsische Identität, die unabhängig von den physikalischen Relationen zwischen diesen Objekten ist. Elementare Quantensysteme haben keine intrinsische Identität und sind demnach grundsätzlich ununterscheidbar (Pauli-Prinzip); (Esfeld 2012, S. 94).

Intrinsische Eigenschaften

Man spricht von intrinsischen Eigenschaften eines Systems, wenn seine grundlegenden, charakteristischen Eigenschaften unabhängig von allen anderen Systemen – insbesondere unabhängig von Messprozessen – sind (Esfeld 2002, S. 198, siehe auch *Verschränkung* und *Individualität*).

Heisenbergsche Unschärferelation

siehe *Unschärferelation*.

Holismus

Im Gegensatz zur klassischen Physik kann in der Quantenmechanik ein physikalisches System im Allgemeinen nicht als aus Teilen zusammengesetzt *gedacht* werden. Das Gesamtsystem lässt sich grundsätzlich nicht aus seinen Teilen und deren Wechselwirkungen beschreiben. Man spricht auch von Nicht-Separabilität (non-separability). Damit wird auch der Atomismus und der Reduktionismus radikal in Frage gestellt. Materie kann nicht in einem naiv-objektiven Sinn aus Atomen, Elementarteilchen usw. zusammengesetzt *gedacht* werden und aus dem Wissen über die Teilchen können die Eigenschaften der

Stoffe und der makroskopischen Objekte nicht abgeleitet werden (d'Espagnat 2003).

Kohärenz

Kohärenz ist die Fähigkeit zu Interferenz. Die Kohärenz ist eine Eigenschaft des Gesamtzustandes eines Quantensystems (beim Doppelspalt z.B. $\Psi = c_1\Psi_1 + c_2\Psi_2$) und nicht der Zustände der Subsysteme Ψ_1 (Spalt 2 geschlossen) und Ψ_2 (Spalt 1 geschlossen) (Joos 2002, S. 178, siehe auch *Superposition* und *Dekohärenz*).

Kollaps der Wellenfunktion

Der Übergang von $\Psi(t)$ nach Ψ_i (Projektionspostulat bzw. Axiom A5) unterbricht die deterministische Zeitentwicklung von $\Psi(t)$ (Axiom A3 und A3'). (Held 2012, S. 78, siehe auch *Messung* und *Axiome*).

Kommutator

Wenn A und B Operatoren, welche Observablen darstellen sind, ist der Kommutator definiert durch: $[A,B] = AB - BA$ (siehe *Vertauschungsrelationen*)

Komplementarität

- „Die Kontinuität der Lichtfortpflanzung in Raum und Zeit [die Lichtwellen, P. S.] einerseits und der atomare Charakter der Lichtwirkungen andererseits müssen ... als komplementär aufgefasst werden, in dem Sinne, dass jede für sich wichtige Züge der Lichtphänomene zum Ausdruck bringt, die, selbst wenn sie vom Standpunkt der Mechanik aus unvereinbar sind, niemals in direkten Gegensatz kommen können, da eine eingehende Analyse des einen oder anderen Zuges aufgrund mechanischer Vorstellungen verschiedene sich gegenseitig ausschliessende Versuchsanordnungen erfordern.“ (Bohr 1958, S. 5).
- „Komplementarität heisst die Zusammengehörigkeit verschiedener Möglichkeiten, dasselbe Objekt als Verschiedenes zu erfahren. Komplementäre Erkenntnisse gehören zusammen, insofern sie Erkenntnisse desselben Objekts sind; sie schliessen einander jedoch insofern aus, als sie nicht zugleich für denselben Zeitpunkt erfolgen können.“ (Klaus Michael Meyer-Abich, 1967, zitiert nach Fischer 2012, S. 173).
- Für Pauli war der Referent der Komplementarität im quantenmechanischen Kontext nur die Inkompatibilität von Observablen (wie etwa Ort und Impuls eines Teilchens) (Primas 1995, Kap. 1.2).
- Komplementäre Quantenphänomene sind nie lediglich dualistisch [z.B. entweder nur Welle oder nur Teilchen], sondern in der Quantenmechanik gibt es immer unendlich viele gleichberechtigte, aber einander ausschliessende Beschreibungsformen. Alle Aspekte sind notwendig, keiner ist richtiger als der andere, keiner kann den anderen ersetzen (Primas 1995, Kap. 1.3.).

Kontextabhängigkeit

Für Niels Bohr sind quantenmechanischen Grössen und quantenmechanische Eigenschaften nur in bestimmten Kontexten (z.B. Mess-Situationen) definiert. Der Wissenschaftsphilosoph Carsten Held hält die Kontextabhängigkeit für das Grundproblem der Quantenmechanik, das auch heute noch nicht begründet ist. (Held 2002, S. 73).

LHV-Theorien

LHV („Local Hidden Variables“) – Theorien beruhen auf der Lokalitätsannahme (siehe dort) und auf der Annahme von verborgenen (bzw. „ontologischen“) Variablen, die keine Observablen sind. Die Existenz solcher Theorien wird durch das Bellsche Theorem widerlegt.

Lokalitätsannahme

Wenn zum Zeitpunkt der Messung keine physikalische Wechselwirkung zwischen zwei Systemen besteht, kann im zweiten System keine Änderung als Folge eines Eingriffes im ersten System stattfinden. Nicht immer wird zwischen *Lokalität* und *Separabilität* klar unterschieden (siehe auch *Nichtlokalität*, *Separabilität*, *Verschränkung*).

Messung

- Die klassische Messung besteht darin, festzustellen, welche Eigenschaften ein System hat. Kurz: Feststellen, was der Fall ist.
- Die quantenmechanische Messung besteht darin, ein Quantensystem durch den Kontakt mit einem Messgerät zu zwingen, eine der möglichen Eigenschaften anzunehmen (Held 2012, S. 83, siehe auch *Kontextabhängigkeit* und *Projektionspostulat*).

Nichtlokalität

Die Wahrscheinlichkeiten für bestimmte Messergebnisse an bestimmten Raumzeitpunkten sind nicht vollständig festgelegt durch das, was im Vergangenheits-Lichtkegel der betreffenden Punkte existiert. Ereignisse, die an Punkten stattfinden, die durch einen raumartigen Abstand von den genannten Punkten getrennt sind, fließen in die Wahrscheinlichkeiten für das, was an diesen Punkten geschieht, ein (Esfeld 2012, S. 91/92, siehe auch *Lokalität*, *Verschränkung*).

Objekte

- ontologische Objekte sind *etwas*, von dem wir sprechen können. Z.B. Teilchen als physikalische Objekte in der Raumzeit. Im Gegensatz zur Kopenhagener QM handelt die Bohmschen Mechanik von ontologische Objekten (Dürr und Lazarovici 2012, S.124).
- In der üblichen Quantenmechanik ist der Begriff *Quantenobjekt* eigentlich ein Oxymoron. Darum wäre der Begriff *Quantensystem* zu bevorzugen.

Operatoren

In der Quantenmechanik werden physikalische Größen durch lineare Operatoren dargestellt, welche die Zustandsfunktion transformieren: $\Psi' = A\Psi$ (Axiom A2).

Beispiele: x-Komponente des Impulsoperators: $A = p_x = \frac{\hbar}{i} \frac{\partial}{\partial x}$

Der Ortsoperator ist schlicht eine Multiplikation von Ψ mit der Koordinate x .

Bei der gemeinsamen Anwendung von Operatoren auf die Zustandsfunktion spielt die Reihenfolge eine Rolle. Beispiel:

$$(p_x x)\Psi = \frac{\hbar}{i}\Psi + \frac{\hbar}{i}x\frac{\partial\Psi}{\partial x} \quad (xp_x)\Psi = \frac{\hbar}{i}x\frac{\partial\Psi}{\partial x} \Rightarrow p_x x - xp_x = \frac{\hbar}{i}$$

siehe auch *Kommutator*, und *Vertauschungsrelation*.

Zum Hamilton-Operator: siehe *Schrödinger-Gleichung*.

Pauli-Prinzip

- In einem Atom können keine zwei Elektronen in allen vier Quantenzahlen übereinstimmen (Wolfgang Pauli, 1925).
- Zwei Fermionen (Teilchen mit halbzahligem Spin, also Baryonen, Quarks und Leptonen) können sich nicht gleichzeitig am selben Ort aufhalten.
- Allgemein: elementare Quantensysteme sind ununterscheidbar.
- Wenn zwei Teilchen ununterscheidbar sind, gilt: $|\Psi(1,2)|^2 = |\Psi(2,1)|^2$.
 $\Rightarrow \Psi(1,2) = \Psi_{\text{sym}}(1,2) = \Psi_{\text{sym}}(2,1)$ oder $\Psi(1,2) = \Psi_{\text{anti}}(1,2) = -\Psi_{\text{anti}}(2,1)$.
Unterscheidet man zwei Zustände a und b, so kann man die folgenden Linearkombinationen bilden, welche die obige Bedingung erfüllen:
 $\Psi_{\text{sym}} = \Psi_a(1) \Psi_b(2) + \Psi_a(2) \Psi_b(1)$ für Bosonen (geradzahligem Spin)
 $\Psi_{\text{anti}} = \Psi_a(1) \Psi_b(2) - \Psi_a(2) \Psi_b(1)$ für Fermionen (ungeradzahligem Spin)
Wären zwei Fermionen im gleichen Zustand, würde $\Psi_a(1) \Psi_a(2) = \Psi_a(2) \Psi_a(1)$ und Ψ_{anti} wäre Null. Die beiden Teilchen können also nicht gleichzeitig im selben Zustand sein.

Präparation

Der Zustand $\Psi(t_0)$ zur Zeit t_0 in der Zeitentwicklung $\Psi(t) = U(t) \cdot \Psi(t_0)$. Messungen sind Präparationen (Held 2012, S. 76; siehe auch *Messung*).

Projektionspostulat

Das Projektionspostulat verordnet einen plötzlichen Übergang von $\Psi(t)$ nach Ψ_a bei der Messung. Damit wird die durch die Schrödingergleichung Zeitentwicklung $\Psi(t) = U(t) \cdot \Psi(t_0)$ vorgeschriebenen unterbrochen (Held 2012, S. 78; siehe auch *Kollaps und Messung*).

Quantenmechanik

- Seit der Vereinigung der Heisenbergschen Matrizenmechanik, die eine Teilchentheorie war, mit der Schrödingerschen Wellenmechanik durch die statistische Deutung der Zustandsfunktion durch Max Born 1926 spricht man von Quantenmechanik (siehe *Bornsche Regel*).
- Zur Abgrenzung von der Quantenelektrodynamik, der Quantenfeldtheorie usw. ist die Quantenmechanik eine Quantentheorie, die sich auf die Beschreibung von Objekten mit Masse beschränkt (Audretsch, 2002, S. 3).

Realismus

- Der wissenschaftliche (bzw. „naive“) Realismus behauptet, dass uns die Wissenschaften wahre Erkenntnisse über eine von uns unabhängig existierenden Welt liefern (Egg 2012, S. 185). Das war und blieb Einsteins Position im Bohr-Einstein-Dialog.
- Entitätenrealismus (oder experimenteller Realismus): „Wenn man [Elektronen] versprühen kann, sind sie real“.
- Kausaler Realismus: Teilchen sind mikroskopische Ursachen lokaler Wirkungen, etwa der Streueignisse, die in Teilchendetektoren registriert werden (Falkenburg 2012, S. 159).
- ontischer Strukturrealismus (siehe *Struktur und Strukturrealismus*).

Separabilität

Das Prinzip der Separabilität [Einstein 1935: „Trennungsprinzip“] besagt, dass die Beziehungen (Relationen), die zwischen physikalischen Systemen bestehen, durch die intrinsischen Eigenschaften der betreffenden Systeme festgelegt sind (Esfeld, 2002, S. 198). Gegenbegriff: *Nichtlokalität*.

Schrödingergleichung

Die Schrödingergleichung bestimmt die Zeitentwicklung des Zustandes $\Psi(t)$:

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi = H\Psi \quad , \quad H = -\frac{\hbar^2}{2m} \vec{\nabla}^2 + V(\vec{x}) \quad (\text{Hamilton-Operator})$$

Dabei ist der Zeitparameter t identisch mit Newtons absoluter Zeit (Kiefer 2012, S. 271).

Singulettzustand

...eines Systems aus zwei Spin- $\frac{1}{2}$ -Teilchen. Die Spinquantenzahl ist $s = \frac{1}{2}$. Jedes der Teilchen besitzt bezüglich einer Raumachse 2 Eigenwerte (Multiplizität). Z.B. die Eigenwerte in der z-Achse: $s_z = \pm \hbar/2$. Die entsprechenden Funktionen der Eigenzustände seien $|\uparrow\rangle$ für $s_z = +\hbar/2$ und $|\downarrow\rangle$ für $s_z = -\hbar/2$.

Der Zustandsvektor des Singulettzustandes ist dann:

$$|\Phi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \{ |\uparrow\rangle_1 |\downarrow\rangle_2 - |\downarrow\rangle_1 |\uparrow\rangle_2 \} .$$

Struktur

Eine Struktur ist ein Netz konkreter physikalischer Relationen, die keine ihnen zugrunde liegenden Objekte voraussetzen, welche über eine intrinsische Identität verfügen (Esfeld 2012, S. 94, siehe auch ontischer *Strukturrealismus*)

Strukturrealismus

Der ontische Strukturrealismus stellt die *Relationen* zwischen Systemen über intrinsische Eigenschaften von Systemen und weist die Idee einer intrinsischen Identität eines Systems zurück (Esfeld 2012, S. 94).

Superpositionsprinzip

Zu zwei erlaubten² Ψ_1 und Ψ_2 kann man unendlich viele weitere erlaubten Zustände konstruieren, in dem man die beiden Zustandsfunktionen mit beliebigen komplexen Zahlen c_1 und c_2 multipliziert und aufaddiert, d.h. die Kombination $\Psi = c_1\Psi_1 + c_2\Psi_2$ bildet (Esfeld 2012, S.90 und Kiefer 2012 S. 270, siehe auch *Kohärenz* und *Verschränkung*).

Die Superposition wird von manchen Autoren als das zentrale Merkmal der Quantentheorie angesehen (z.B. Audretsch, 2002, S. 36). Alle „merkwürdigen“ Eigenschaften von Quantensystemen lassen sich letztendlich auf die Superponierbarkeit zurückführen (Joos 2002, S. 170).

Überlagerungsprinzip

siehe *Superpositionsprinzip*

² „Erlaubt“ heisst: Die Zustandsfunktion ist eine Lösung der Schrödingergleichung.

Unitarität

- Erhaltung des Betrags von Vektoren (z.B. bei Drehungen).
- Der Zeitentwicklungsoperator $U(t) = \exp(-iHt)$ des Zustandsvektors $\Psi(t)$ ist unitär.

Unschärferelation (Unbestimmtheitsrelation)

- Es gibt keinen quantenmechanischen Zustand, in dem sowohl der Ort als auch der Impuls einen dispersionsfreien Wert hat.
 Δp und Δq sind keine Messfehler sondern Dispersionswerte von Impuls und Ort.
 $\Delta p \Delta q \geq \hbar/2$ ist eine Folge der viel tiefer liegenden kanonischen Vertauschungsrelation. Und erst diese impliziert die Komplementarität von Ort und Impuls (Primas 1995, Kap. 1.4, siehe *Vertauschungsrelation*).
- Allgemein: Sind A und B hermitesche Operatoren, die je eine physikalische Grösse darstellen, so ist das Produkt ihrer Dispersionswerte (Schwabl 1988, S. 85/86):

$$\Delta A \cdot \Delta B \geq \frac{1}{2} |\langle [A, B] \rangle| \quad |\langle \dots \rangle| = \text{Betrag des Erwartungswerts des Kommutators.}$$

Verschränkung (Entanglement)

Zwischen verschränkten Systemen bestehen Korrelationen, auch wenn zwischen ihnen keine physikalische Wechselwirkung stattfindet und auch wenn diese weit voneinander entfernt sind. Eine Messung an einem System lässt zum gleichen Zeitpunkt eine Aussage über Messwerte am anderen System zu (z.B. EPR-Gedankenexperiment). Nur das Gesamtsystem kann durch einen definierten Zustandsvektor beschrieben werden, nicht aber die Teilsysteme. Anders gesagt: Aus der Kenntnis der Zustände der Teilsysteme kann der Zustand des Gesamtsystems nicht abgeleitet werden. Das Ganze ist in einem physikalisch nichttrivialen Sinne mehr als die Summe der Teile. In der Verschränkung zeigt sich die Nichtlokalität und Ganzheitlichkeit (Holismus) von Quantensystemen. (d'Espagnat 2003; Kiefer 2012, S. 270; siehe auch *Holismus, EPR-Korrelation* und *Nichtlokalität*).

Vertauschungsrelation

Die kanonische Vertauschungsrelation $[x, p_x] = x \cdot p_x - p_x \cdot x = i\hbar$ impliziert die Komplementarität von Ort und Impuls. Aus dieser Vertauschungsrelation kann die Heisenbergsche Unschärferelation hergeleitet werden (Primas 1995, Kap. 1.4, Schwabl 1988, S. 85/86, siehe auch *Unschärferelation*).

Vollständigkeit einer Theorie

- Einsteins Vollständigkeitskriterium von 1935: „Jedes Element der physikalischen Realität muss seine Entsprechung in der physikalischen Theorie haben.“
- Wenn eine Theorie fundamental sein soll, muss sie vollständig sein.

Wellenfunktion

siehe *Zustand* und *Zustandsfunktion*.

Welle-Teilchen-Dualismus

... hat heute nur noch historisches Interesse. Photonen oder Elektronen sind weder Wellen noch Teilchen. Solche Elementarsysteme können sich in extrem lokalisierten oder extrem delokalisierten Zuständen befinden, aber es gibt unendlich viele andere Zustände, welche weder wellenartig noch teilchenartig sind (Primas 1995, Kap. 1.3., siehe auch *Komplementarität*).

Subatomare Teilchen breiten sich als Wellen aus, doch werden sie als Teilchen registriert (Falkenburg 2012, S. 177 f.).

Zeitentwicklung:

Die Zeitentwicklung des Zustandsvektors $\Psi(t)$ ist deterministisch und wird durch die Schrödingergleichung beschrieben (Siehe *Schrödingergleichung* und *Axiome* insbesondere A3).

$\Psi(t) = U(t) \cdot \Psi(0)$, wobei $U(t) = e^{-iHt}$ der unitäre Zeitentwicklungsoperator ist.

Zustand

- Zustandsvektor im Hilbertraum (die Wellenfunktion) für reine Zustände mit diskreten Eigenwerten:

$$\Psi = \sum_n c_n \Psi_n \quad \text{mit} \quad c_n = (\Psi_n, \Psi) \quad \sum_n |c_n|^2 = 1 \quad \text{und} \quad (\Psi_m, \Psi_n) = \delta_{mn}$$

$|c_n|^2$ ist die Wahrscheinlichkeit, den Eigenwert a_n zu messen, wenn $A\Psi_n = a_n\Psi_n$ (Schwabl 1988, S. 31-35).

- Gemischte Zustände bestehen aus reinen Zuständen, die nicht miteinander interferieren. Beschreibung durch einen statistischen Operator (Dichteoperator):

$$\hat{\rho} = \sum_n p_n |\Psi_n\rangle\langle\Psi_n| \quad \text{mit} \quad \sum_n p_n = 1 \quad \text{und} \quad \text{Spur}(\hat{\rho}) = 1$$

Der Dichteoperator beschreibt, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein aus einem Ensemble gleichartiger Systeme herausgegriffenes System im Zustand $|\Psi_n\rangle$ angetroffen werden kann.

$|\Psi_n\rangle\langle\Psi_n|$ ist der Projektionsoperator des Zustands $|\Psi_n\rangle$.

- verschränkte Zustände von zwei oder mehreren [oder gar allen] Quantensystemen (siehe *Verschränkung*).

Zustandsfunktion, Zustandsvektor

Die Begriffe *Zustandsfunktion* und *Zustandsvektor* sowie *Wellenfunktion* werden hier synonym behandelt (siehe *Zustand*).

Literatur:

AUDRETSCH, JÜRGEN (Hg., 2002): *Verschränkte Welt – Faszination der Quanten*, Weinheim: Wiley_VCH.

BAUMANN, KURT und SEXL, ROMAN U. (1987): *Die Deutungen der Quantentheorie*, Braunschweig: Vieweg.

BOHM, DAVID (1952): *Vorschlag einer Deutung der Quantentheorie durch „verborgene“ Variable*. In Baumann/Sexl 1987, S163-192.

- BOHR, NIELS (1958): *Atomphysik und menschliche Erkenntnis*, Bd. 1, Braunschweig: Vieweg.
- DÜRR, DETLEF und LAZAROVICI, DUSTIN (2012): *Quantenphysik ohne Quantenphilosophie*. In: ESFELD, MICHAEL (Hg): *Philosophie der Physik*: stw 2033.
- EINSTEIN, ALBERT; PODOLSKY BORIS; ROSEN, NATHAN (1935): *Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?* Phys. Rev **47**, 777-780 (1935); in deutscher Übersetzung: BAUMANN / SEXL 1987, S. 80 ff).
- ESFELD, MICHAEL (2002): *Quantentheorie: Herausforderung an die Philosophie!* In: AUDRETSCH, JÜRGEN (Hg., 2002): *Verschränkte Welt – Faszination der Quanten*, Weinheim: Wiley_VCH.
- ESFELD, MICHAEL (2012): *Das Messproblem der Quantenmechanik heute: Übersicht und Bewertung*. In: ESFELD, MICHAEL (Hg): *Philosophie der Physik*: stw 2033.
- D'ESPAGNAT, BERNARD (2003) *Veiled Reality: An Analysis of Quantum Mechanical Concepts*, 2003, Westview Press.
- FALKENBURG, BRIGITTE (2012): Was sind subatomare Teilchen?. In: ESFELD, MICHAEL (Hg): *Philosophie der Physik*: stw 2033, S. 158-184.
- FISCHER, ERNST P. (2012): *Niels Bohr – Physiker und Philosoph des Atomzeitalters*, München: Siedler.
- HELD, CARSTEN (2002): *Die Bohr-Einstein-Debatte und das Grundproblem der Quantenmechanik*. In: AUDRETSCH 2002.
- HELD, CARSTEN (2012): *Die Struktur der Quantenmechanik*. In: ESFELD, MICHAEL (Hg): *Philosophie der Physik*: stw 2033.
- JOOS, ERICH (2002): *Dekohärenz und der Übergang von der Quantenphysik zur klassischen Physik*. In: AUDRETSCH, JÜRGEN (Hg., 2002): *Verschränkte Welt – Faszination der Quanten*, Weinheim: Wiley_VCH, S. 169-195.
- KIEFER, CLAUS (2012): *Quantengravitation*. In: ESFELD, MICHAEL (Hg): *Philosophie der Physik*: stw 2033.
- PRIMAS, HANS (1995): *Komplementaritäts-Seminar*, ETH Zürich, WS 1994/95, unveröffentlicht.
- SCHWABL, FRANZ (1988): *Quantenmechanik*, Berlin: Springer-Lehrbuch.