

## Zentrale Begriffe der Quantenphysik

Begriff	Fachliche Erklärung	Erklärung für Schüler	Beispiele für Verwendung	Anmerkungen
Zustand (Wellenfunktion)	<p>Quantenobjekte werden in der Theorie mathematisch durch Wellengleichungen beschrieben (Schrödingergleichung, Maxwell-Gleichungen usw.)                      Eine Lösung der entsprechenden Wellengleichung, deren Summe bzw. Integral über die Amplitudenquadrate (Betragsquadrate im vektoriellen Sinn) 1 ist, wird als Zustand bezeichnet.</p>	<p>Quantenobjekte werden mathematisch durch Wellengleichungen beschrieben. Ein Zustand ist die Lösung der zugehörigen Wellengleichung, die gesamte Intensität wird auf 1 gesetzt.</p>		
Präparation (eines Zustands)	<p>Ein physikalisches System wird zu Beginn eines Experiments so präpariert, dass dessen Anfangszustand (d.h. der Zustand zu einem bestimmten Anfangszeitpunkt) bekannt ist. Die Wellengleichung bestimmt dann die weitere zeitliche Entwicklung des Zustands.</p>	<p>Man stellt zu Beginn eines Experiments einen bekannten Zustand her.</p>		
Superposition / Überlagerung	<p>Ein Zustand ist in der Regel eine additive Überlagerung von mehreren Teilfunktionen/ Teilzuständen, ob dies so ist, hängt auch von der gewählten Basis für den Zustandsraum ab. Sind alle Teilzustände orthogonal (senkrechte Vektoren), so ergibt sich das Integral als die Summe der Betragsquadrate der Amplituden der</p>	<p>Zustände bestehen meist aus mehreren Teilzuständen, so wie Wellen sich aus mehreren Teilwellen durch ungestörte Überlagerung zusammensetzen.</p>	<p>Teilzustände mit horizontaler und vertikaler Polarisation stehen senkrecht aufeinander, deshalb muss die Summe der Betragsquadrate der zugehörigen Amplituden 1 ergeben.</p>	

	Teilzustände.			
Messung von Größen	Nur solche Größen sind Messgrößen, für die es einen geeigneten Operator gibt, dazu gehören Ort, Impuls, Energie und Polarisation bzw. Spin, aber nicht z.B. Geschwindigkeit oder Bahn. Das Messergebnis ist stets ein Eigenwert des zugehörigen Operators, z.B. Ort $x$ , Impuls $p$ , Energie $E$ , aber bei Polarisation für eine Richtung 1 oder 0, bei Spin $1/2$ sind es $+1/2$ oder $-1/2$ . Ist ein Zustand ein Eigenzustand eines Operators, so wird stets derselbe Wert gemessen.	Für eine Messung wird ein geeignetes Messgerät benötigt, z.B. ein Schirm für den Ort oder einen Analysator für die Polarisation. Nicht alle Größen lassen sich direkt messen. Der Zustand bestimmt, welche Messwerte erzielt werden können. Dazu darf die Amplitude des Teilzustand nicht null sein.		
Stochastische Deutung	Die Amplitude eines Eigenzustands in einer Überlagerung aus mehreren Teilzuständen (Teilzustände zu unterschiedlichen Eigenwerten sind immer orthogonal) gibt mit seinem Betragsquadrat die Wahrscheinlichkeit an, dass dieser Eigenwert gemessen wird. (Deshalb muss die Summe aller Betragsquadrate 1 ergeben.)	Aus dem Zustand lassen sich über die Betragsquadrate der Amplituden die Wahrscheinlichkeiten berechnen, mit der die möglichen Messwerte tatsächlich gemessen werden.	Bei Licht stellt die Intensitätsverteilung die Wahrscheinlichkeitsverteilung für die Photonen dar (wenn man die Fläche auf 1 setzt).	
komplementäre Größen	Zu jeder Messgröße lässt sich so aus dem Zustand eine Wahrscheinlichkeitsverteilung für die Messwerte berechnen. Dazu muss man aber in die Basis der Eigenzustände wechseln. Eine solche Verteilung hat dann einen Mittelwert und eine Standardabweichung. Bei sogenannten komplementären	Ort und Impuls sind komplementär, ein Zustand kann nicht gleichzeitig nur einen Messwert für den Ort und nur einen Messwert für den Impuls haben. Die Standardabweichungen für beide Größen erfüllen	Reduziert man bei Einzelspalt die Spaltbreite, so wird das Interferenzmuster breiter. Reduziert man bei einem linearen Potenzialtopf die Breite, wird die	Genau genommen gibt es überhaupt keine Zustände mit eindeutig definiertem Ort oder eindeutig definiertem Impuls (In der Unbestimmtheitsrelation kann kein Faktor Null sein).

	Größen, insbesondere Ort und Impuls, führen die nicht miteinander kompatiblen Basen zur Unbestimmtheitsrelation: Es gibt keine Zustände, in denen jede der kompatiblen Größen nur genau einen Wert annehmen kann.	die Unbestimmtheitsrelation.	Impulsunschärfe größer.	
Polarisation	Polarisation bezeichnet eine Eigenschaft eines Zustands, nämlich, dass der Zustand ein Eigenzustand des zugehörigen Operators ist: Alle Messungen der entsprechenden Polarisation am Zustand ergeben das Ergebnis 1.	Zustände können polarisiert sein, das bedeutet, dass das zugehörige Feld (z.B. das elektrische Feld bei elektromagnetischen Wellen) immer dieselbe Richtung hat. Einem einzelnen Photon kann man keine Polarisation zuschreiben.	Lässt ein Polarisationsfilter / Analysator alle Photonen eines Zustands durch, ist dieser entsprechend polarisiert.	Würde man annehmen, dass ein Photon eine Polarisation „hat“, müsste diese bestimmen, mit welcher Wahrscheinlichkeit es durch einen Analysator gelangt. Dies führt aber zu Widersprüchen bei der Superposition von Teilzuständen unterschiedlicher Polarisation.
Interferenz	Zustände sind im Allgemeinen eine Superposition (Überlagerung) aus unterschiedlichen Teilzuständen. Verstärken sich diese Teilzustände an einem Ort, oder löschen sie sich aus, spricht man von Interferenz, ein typisches Interferenzmuster erscheint.	Quantenobjekte zeigen Interferenz, wenn die zugehörigen Wellen Interferenz zeigen.	Doppelspalt, Auslöschung in einem Ausgang eines Mach-Zehnder-Interferometers	Interferenz ist ein Spezialfall von Superposition.
Nichtlokalität	Führt man eine Messung an einem Ort durch, so tragen dazu alle Teilwellen bei, die diesen Ort erreichen können, diese Information wird aus allen Teilen des Systems, also von unterschiedlichen Orten aus (nichtlokal) zusammengetragen. Man	Für die Vorhersage eines Messergebnisses müssen immer alle Informationen des gesamten, räumlich ausgedehnten Systems berücksichtigt werden. Man kann nicht	Bombentest	Ob man sich vorstellen darf, dass ein Quantenobjekt immer einen Ort hat, kann offen bleiben, solange man klarstellt, dass man dann aber nicht denken darf, nur die Wechselwirkungen an

	darf also nicht annehmen, dass ein Quantenobjekt bereits durch einen Teilzustand, z.B. einen Arm im Interferometer, beschrieben werden kann, auch wenn man sich nicht vorstellen kann, dass ein Quantenobjekt an unterschiedlichen Orten gleichzeitig ist (was nahe liegt, weil es ja immer nur an einem Ort gemessen werden kann.)	annehmen, dass ein Quantenobjekt nur durch Wechselwirkungen an seinem Ort beeinflusst wird – die klassische Vorstellung versagt.		diesem Ort seien für die weitere Zeitentwicklung relevant.
Komplementarität	Möchte man herausfinden, durch welchen Arm eines Interferometers ein Quant geht, muss man dort eine Ortsmessung vornehmen. Dadurch wird aber der Zustand so gestört, dass die Interferenz nicht mehr beobachtet werden kann, weil nur noch eine Teilwelle am Ausgang ankommt. Man kann nur Interferenz oder einen Teilzustand messen.	Ein Versuch, den Ort eines Quantenobjekt zu messen, macht die Beobachtung von Interferenz unmöglich, man kann nur das eine oder das andere messen.	Einbau eines Detektors in einen Arm eines Interferometers	
Delayed Choice	Bei einem delayed-choice Experiment wird der Zustand des Systems verändert, nachdem der Anfangszustand präpariert wurde, beispielsweise wird nach dem Passieren des ersten Strahlteilers der zweite entfernt, oder es wird nachträglich eine Ortsmessung hinzugefügt oder weggenommen. In jedem Fall lässt sich das Ergebnis durch die zeitliche Entwicklung des gesamten Zustands beschreiben, also der Summe aller Teilzustände, was	Bei der Veränderung eines Versuchsaufbaus nach der Präparation eines Anfangszustands müssen stets alle möglichen Wechselwirkungen zu der Zeit am Ort der Teilzustände berücksichtigt werden, wenn die Teilwellen dort vorbeikommt. Quanten entscheiden sich nicht für	Hinter einem Doppelspalt oder einem Strahlteiler ist ein Quantenobjekt in einer Superposition aus zwei Teilzuständen, nicht entweder in dem einen oder anderen Teilzustand.	Werden die Teilzustände unterschiedlich polarisiert, kann durch Messung der Polarisation trotzdem nicht entschieden werden, in welchem Teilzustand das Quant war, da der Zustand ja bekannt ist, und der war eine Superposition der Teilzustände.

	<p>zeigt, dass ein Quant nicht einen der Teilzustände wählt (choice) , auch nicht nachträglich (Delayed choice), sondern aufgrund der Nichtlokalität immer alle Teilzustände zum Endzustand bzw. Messergebnis beitragen: Jede Wechselwirkung wird als Wechselwirkung mit dem Zustand beschrieben, nicht nur am angenommen Ort eines Quantenobjekts.</p>	<p>einen Zustand einer Superposition.</p>		
<p>Kausalität</p>	<p>Delayed-Choice-Experiment werden manchmal so gedeutet, dass ein Quantenobjekt dazu gebracht werden kann, die Entscheidung, durch welchen Arm des Interferometers oder Spalt eines Doppelspalts es geht, nachträglich, also rückwärts in der Zeit getroffen wird. Dies widerspricht der Tatsache, dass alle Gleichungen der Physik kausal sind, also eine Wirkung nur stets nach der Ursache erfolgen kann und, nimmt man die Relativitätstheorie hinzu, nur an Orten erfolgen kann, die mit Geschwindigkeit kleiner oder gleich der Lichtgeschwindigkeit erreicht werden können.</p>	<p>Alle Grundgesetze der Physik sind kausal: Die Wirkung einer Ursache kann nur in der Zukunft liegen und nur dort, wo sie mit höchstens Lichtgeschwindigkeit gelangen kann. Die Veränderung eine Versuchsaufbaus zwischen Präparation und Messung hat keinen Einfluss auf die Vergangenheit.</p>		