

Quantenphysik für Alle

Publiziert am 27. Mai 2019 von Günter Dedie auf <https://www.zum-muendigen-buerger.de>



Es ist zu einer Mode geworden, die Quantenphysik zur Begründung religiöser oder anderer esoterischer Aussagen zu missbrauchen. Beispiele dafür sind Bücher von Lothar Schäfer, Thomas Kohl und Ulrich Warnke. Diese Autoren erwarten offenbar, dass die meisten ihrer Leser die Quantenphysik für unverständlich und geheimnisvoll halten, sie also sowieso nicht verstehen und deshalb als scheinbare Begründung für irgendwelche transzendente Aussagen "schlucken". (Grafik: *Quanten Fractal*; Quelle Pixabay)

Bekannte Themen wie die spukhafte Fernwirkung, der Welle-Teilchen-Dualismus, die Unschärfe-Relation, die Quantenverschränkung, das Gedankenexperiment mit Schrödingers Katze oder sog. Multiversen werden gern als Aufreißer genutzt, um die Leser zu beeindrucken,

obwohl die Themen schon seit Jahrzehnten gut bekannt und geklärt sind. Meist werden dabei unzutreffende Aussagen in bekannte zutreffende Aussagen eingebettet und damit die [Methode der Desinformation](#) angewandt. Dem kommt ein gewisser Bedarf vieler Leser nach Geheimnissen und anderen Sensationen entgegen, sowie eine erhebliche Neigung zur Oberflächlichkeit, die leider inzwischen zu einem häufig zu beobachtenden Merkmal unserer Kultur geworden ist.

Die Quantenphysik ist aber gar nicht so unverständlich, wie es oft kolportiert wird. Ich möchte deshalb versuchen, hier nach dem Motto meiner Internetseite "Naturwissenschaft für Alle" einige Grundlagen der Quantenphysik verständlich (aber trotzdem wissenschaftlich korrekt) darzustellen, und damit die klassische *Aufklärung* in den Bereich der Quantenphysik hinein fortsetzen. Das ist zwar keine reinrassige Emergenz, aber eine notwendige und sinnvolle Basis für das Verständnis vieler emergenter Prozesse, insbesondere im Bereich der Elementarteilchen, Atome und Moleküle.

Bitte zögern Sie nicht, Fragen und Hinweise zu diesem Artikel als Kommentare zu posten. Jede Frage ist eine Chance zur Verbesserung der Verständlichkeit und des Inhalts!

Allgemeines

Die von der Quantenphysik behandelten Teilchen und Felder nennt man *Quantenobjekte*. Beispiele für Teilchen sind Elektronen und Protonen, für Felder das elektromagnetische Feld. Die Quantenphysik umfasst zwei Teilbereiche, die *Quantenmechanik* und die *Quantenfeldtheorie*. Erstere beschreibt das Verhalten von Teilchen unter dem Einfluss von Feldern. Letztere behandelt zusätzlich die Felder als Quantenobjekte. Die Vorhersagen beider Theorien stimmen außerordentlich gut mit den Ergebnissen aller Experimente überein. Ich behandle hier zunächst nur die Quantenmechanik.

Die metaphysischen Grundlagen der Quantenmechanik¹ bestehen aus vier Axiomen:

1. Es gibt Zustandsvektoren (die sog. *Wellenfunktionen*),
2. deren zeitliche Entwicklung beschreibt die Schrödingergleichung,
3. physikalische Messwerte sind Eigenwerte von Operatoren, angewandt auf die Zustandsvektoren, und
4. quantenmechanische Systeme können im Zustandsraum zusammengesetzt werden.

Wellenfunktionen, Dualität und Nichtlokalität

In der Quantenmechanik werden die Quantenobjekte und ihre Eigenschaften durch Wellenfunktionen repräsentiert, einschließlich ihres dualen Charakters als Teilchen oder Welle. Wellenfunktionen von Quantenteilchen (freien oder in Systemen gebundenen Teilchen) sind Lösungen der *Schrödingergleichung*, der Grundgleichung der Quantenmechanik. Die einfachsten Wellenfunktionen sind mathematische Funktionen in drei Dimensionen, allerdings auf Basis der komplexen Zahlen. Jedes Quantenteilchen hat eine bestimmte ("gequantelte") Energie. Die Energie der Photonen beispielsweise ist abhängig von der Farbe bzw. Wellenlänge bzw. Frequenz der elektromagnetischen Welle und entspricht der maximal übertragbaren Energie bei der Wechselwirkung eines Photons als Teilchen.

Ein Quantenteilchen darf man sich nicht punktförmig vorstellen, sondern als eine Art Wolke, für die die Wellenfunktion die Aufenthaltswahrscheinlichkeit des zugehörigen Teilchens in Raum und Zeit beschreibt. Darin besteht die sog. *Nichtlokalität* der Quantenteilchen. Relativ anschaulich ist das bei Photonen, den Quantenteilchen der e-

¹ <https://www.univie.ac.at/physikwiki/images/3/3d/Kapitel9.pdf>

elektromagnetischen Wellen. Aber auch sie können als Teilchen agieren, beispielsweise wenn sie auf eine Metalloberfläche treffen und dort Elektronen herausschlagen. Ebenso darf man sich Elektronen, die in Atomen gebunden sind, nicht als kleine Kügelchen vorstellen, die wie Planeten um den Atomkern fliegen, sondern als im Atom lokalisierte, gebundene Wellenfunktionen, vergleiche Bild 1.

Die *Schrödingergleichung* ist eine relativ einfache lineare Differenzialgleichung, die die zeitliche Änderung einer Wellenfunktion mit ihrem aktuellen Zustand im Raum verbindet, sowie - wenn vorhanden - einer auf das Quantenteilchen ausgeübten Kraft. Nur für die einfachsten Wellenfunktionen gibt es berechenbare Lösungen auf Basis mathematischer Funktionen. Beispiele dafür sind freie Photonen oder das Elektron im Wasserstoffatom.

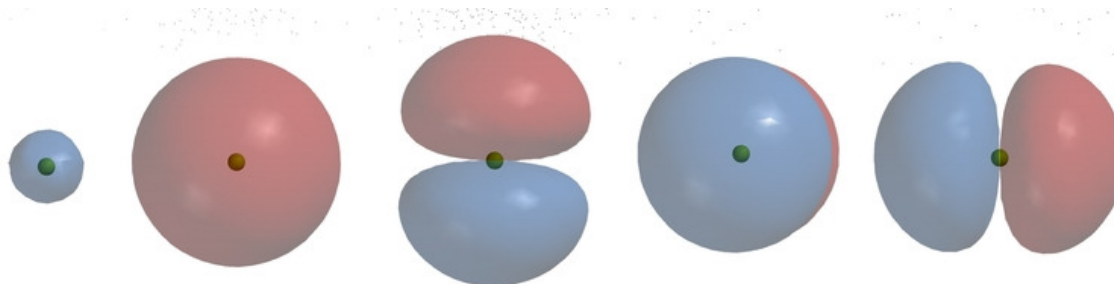


Bild 1: Einfache Wellenfunktionen des Wasserstoffatoms (Quelle: Wikimedia commons, bearbeitet)

Das Bild veranschaulicht die einfachsten dreidimensionalen Wellenfunktionen des Wasserstoffatoms in den Elektronenschalen 1 und 2, dargestellt in zwei Dimensionen: Ganz links ist der Grundzustand 1s dargestellt. Das ist der Zustand des Elektrons mit der niedrigsten Energie, in dem sich das Atom normalerweise befindet. Weiter rechts sehen Sie die vier angeregte Zustände 2s und 2p mit etwas höherer Energie. Diese werden z.B. dann vom Elektron des Wasserstoffatoms besetzt, wenn das Atom im Grundzustand eine passende Energie aufgenommen hat, sei es von einem absorbierten Photon oder bei einem Zusammenstoß mit einem anderen Atom. Die Zusätze s und p kennzeichnen die Form der Wellenfunktionen: s kennzeichnet kugelförmige und p hantelförmige Formen. Man kann die Bilder auch als Form der Elektronenwolken ansehen. Dargestellt ist der Bereich, in dem sich das Elektron mit einer Wahrscheinlichkeit von 90% befindet. Mit den restlichen 10% Wahrscheinlichkeit befindet es sich irgendwo außerhalb dieses Bereichs.

Wahrscheinlichkeiten

Als unverständliche Besonderheit in der Quantenmechanik werden immer wieder diese mit ihr verbundenen Wahrscheinlichkeits-Aussagen "strapaziert". Wir haben schon gesehen, dass die Wellenfunktion die Wahrscheinlichkeit beschreibt, mit der sich das Quantenteilchen an einer Stelle im Raum aufhält. Diese wird durch den Wert der Wellenfunktion festgelegt: An den Stellen, wo die Wellenfunktion große Werte hat, ist auch die Wahrscheinlichkeit groß, das Quantenteilchen anzutreffen. Genau so ist es mit der Lebensdauer von Quantenteilchen: Für ein einzelnes Teilchen kann man nur eine Wahrscheinlichkeits-Aussage machen. Für ein großes Kollektiv von Quantenteilchen ist allerdings sehr genau festgelegt, wann z.B. die Hälfte der Teilchen zerfallen ist. Dafür steht die sog. *Halbwertszeit* der Teilchen.

Die Wahrscheinlichkeiten in der Quantenmechanik sind aber kein gänzlich neues "Hexenwerk", denn Wahrscheinlichkeits-Aussagen gab es schon immer auch anderswo in Physik und Chemie, sobald große Kollektive von Teilchen eine Rolle spielen. Beispielsweise in der Theorie der Idealen Gase.

Die Unschärfe-Relation

Die Heisenbergsche *Unschärfe-Relation* sagt aus, dass man den Ort und den Impuls eines Quantenteilchens nicht gleichzeitig beliebig genau feststellen kann: Entweder der Ort ist genau feststellbar, dann ist der Impuls unbestimmt, oder umgekehrt. Etwas Vergleichbares gibt es in der klassischen Physik nicht. Wie ist das zu verstehen? Dazu muss man zunächst wissen, was ein *Impuls* ist. In der Mechanik ist der Impuls das Produkt aus Masse und Geschwindigkeit eines Körpers. Und weil man in der Mechanik Ort und Geschwindigkeit für einen Körper gleichzeitig sehr genau messen kann, war es anfangs rätselhaft, warum das für ein Quantenteilchen nicht auch möglich sein soll. Betrachtet man das Quantenteilchen als Wellenfunktion, so kann man das Prinzip der Unschärfe-Relation mit einem anschaulichen Vergleich an einem einfachen Beispiel erläutern. Ich verwende dazu als Modell zwei Wellenfunktionen in einer Dimension:

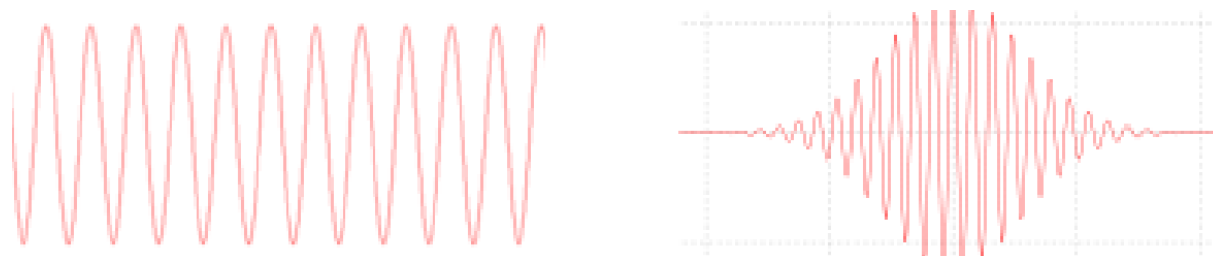


Bild 2: Ausgedehnte Welle eines freien Teilchens und Wellenpaket eines gebundenen Teilchens

Im Bild 2 ist auf der linken Seite die Wellenfunktion eines "freien" Teilchens schematisch dargestellt, und rechts die Wellenfunktion eines "lokalisierten", gebundenen Teilchens. Man sieht, dass beide Wellenfunktionen im Raum ausgedehnt sind. Der Unterschied besteht aber darin, dass das freie Teilchen aus einer Welle mit nur einer Frequenz besteht, die unendlich weit ausgedehnt ist. Das gebundene Teilchen ist dagegen aus vielen Wellen mit unterschiedlichen Frequenzen zusammengesetzt und relativ gut lokalisiert. Durch eine geeignete Überlagerung von Wellen unterschiedlicher Frequenzen entsteht ein sog. *Wellenpaket*, das auf eine bestimmte räumliche Ausdehnung konzentriert ist. In drei Dimensionen ist das beispielsweise vergleichbar mit einem Elektron, das in einem Atom gebunden ist, vgl. Bild 1.

Für die Erläuterung der Unschärfe-Relation müssen wir nun noch wissen, wie der Impuls einer Welle festgelegt ist: Er ist proportional zu ihrer Frequenz. Damit können wir dann in Bild 2 folgenden Vergleich vornehmen:

- Für das "freie" Teilchen links ist zwar die Frequenz und damit der Impuls genau festgelegt, weil es nur eine einzige Frequenz hat. Der Ort ist aber völlig unbestimmt, weil die Welle "unendlich" ausgedehnt ist.
- Für das "lokalisierte" Teilchen rechts ist zwar der Ort recht genau bekannt (dort, wo der größte Teil des Wellenpakets konzentriert ist), dafür kann man aber den Impuls nicht festlegen, weil das Wellenpaket aus vielen unterschiedlichen Wellen mit unterschiedlichen Frequenzen - und damit vielen unterschiedlichen Impulsen - zusammengesetzt ist.

Die Unschärfe-Relation ist also eine unmittelbare Folge des Tatbestandes, dass die Quantenteilchen Wellenfunktionen sind.

Verschränkung von Quantenteilchen

Auch die *Verschränkung* (besser: *Korrelation*) von Quantenteilchen ist relativ leicht zu verstehen, wenn man sie im Modell der Wellenfunktionen betrachtet. Nehmen wir als Beispiel die Wellenfunktionen von zwei Quantenteilchen, so können wir zwei Fälle unterscheiden:

- Die beiden Teilchen haben jeweils eine eigene Wellenfunktion (so ist es normalerweise), oder
- die beiden Teilchen haben eine gemeinsame Wellenfunktion (nur in physikalischen Sonderfällen).

Die Verschränkung gibt es ausschließlich im Fall der gemeinsamen Wellenfunktion für zwei (oder mehr) Quantenteilchen. Diesen Fall gibt es aber nur unter sehr speziellen physikalischen Bedingungen.

Ein Beispiel: Gammastrahlung mit einer Energie von mehr als 1 MeV kann in der Nähe eines Atoms "aus dem Nichts" (nämlich dem Vakuum) ein Elektron-Positron-Paar erzeugen (das Positron ist das sog. Antiteilchen des Elektrons), die dann auseinander fliegen. Diese beiden Quantenteilchen sind nach der Paarerzeugung miteinander verschränkt.

Was bedeutet nun die Verschränkung? Die verschränkten Quantenteilchen haben, wie schon gesagt, eine gemeinsame Wellenfunktion. Diese Wellenfunktion bestimmt den Zustand der beiden Teilchen und ist nicht lokalisiert, sondern erstreckt sich über das gesamte räumlich verteilte System der Teilchen (vgl. das Beispiel in Bild 1) und - wie jede Wellenfunktion - auch noch darüber hinaus. Wenn man nun in irgendeiner Weise diese gemeinsame Wellenfunktion ändert, sind beide Teilchen betroffen.

Die physikalischen Eigenschaften des einen Teilchens sind über die gemeinsame Wellenfunktion explizit mit denen des anderen Teilchens korreliert: Wenn man an einem Teilchen etwas ändert, reagiert auch das andere mit der physikalisch *entgegengesetzten* Änderung, und zwar ganz unmittelbar und über beliebig weite Entfernungen wegen der beliebig weiten Ausdehnung ihrer Wellenfunktion. Das ist die sog. "spukhafte Fernwirkung".

Ändert man im Beispiel von Elektron und Positron den sog. *Spin* (das magnetische Moment) eines der beiden verschränkten Teilchen, so reagiert das andere sofort mit der entgegengesetzten Änderung des Spins. Das ist natürlich wirklich verblüffend, und die dafür gemessene Geschwindigkeit ist auch noch viel größer als die des Lichts! Aber Vorsicht: Eine Übertragung von Information (oder gar Materie) mit Überlichtgeschwindigkeit ist mit der Verschränkung allein nicht möglich. Die Korrelation zwischen verschränkten Teilchen kann "nur" zur Korrelation einer Informationsübertragung in einem "normalen" Informations-Übertragungskanal benutzt werden, beispielsweise einer Glasfaserverbindung. Diese überträgt die Information aber maximal mit der Lichtgeschwindigkeit in der Glasfaser.

Kollektive Quantenphänomene

Kollektive Quantenphänomene sind meines Wissens noch nicht in die pseudo-wissenschaftliche Literatur vorgebracht. Aber "was nicht ist, kann ja noch werden"; darum hier gleich etwas Prophylaxe für diesen Fall. Kollektive Quantenphänomene sind verbunden mit sog. *makroskopischen Quantenzuständen*. Das sind stabile Zustände eines Kollektivs mikroskopischen Quantenteilchen, die makroskopische Ausmaße haben. Auf den ersten Blick sieht das wie ein Widerspruch in sich aus, aber: Das einfachste, allgemein bekannte Beispiel für ein Quantenteilchen von makroskopischen Ausmaßen ist der kristalline Festkörper. Das ist Materie im festen Zustand mit einer *Fernordnung*, der Kristallstruktur. Die Struktur ist beispielsweise bei der spontanen selbstorganisierten Kristallisation aus dem flüssigen oder gasförmigen Zustand entstanden, die auf den physikalischen Wechselwirkungen zwischen benachbarten Atomen oder Molekülen beruht. Auch andere bekannte Materiezustände wie der Ferromagnetismus und die Supraleitung sind makroskopische Quantenzustände.

Stabilität der Atome

Eines der größten Probleme in der frühen Atomphysik war die Erklärung der Stabilität der Atome. Das klassische Atommodell, bei dem die Elektronen wie auf Planetenbahnen um den Atomkern kreisen, liefert keine Stabilität, weil Elektronen auf Kreisbahnen elektromagnetische Strahlung aussenden (sog. *Synchrotron-Strahlung*), dadurch laufend ihre Energie verlorenght und die Elektronen nach kurzer Zeit in den Kern stürzen. Eine Erklärung war erst im Rahmen der Quantenmechanik möglich.

Fangen wir mit dem einfachen Wasserstoffatom an: Die Schrödingergleichung ergibt für ein Elektron im elektrischen Feld eines Protons eine mathematisch berechenbare *stabile* Wellenfunktion, wie sie in Bild 1 ganz links dargestellt ist. Das ist der sog. *Grundzustand* des Wasserstoffatoms, der Zustand minimaler Energie. Rechts davon in Bild 1 sind einige Wellenfunktionen der sog. *angeregten Zustände* dargestellt, die nur eine bestimmte, im Kollektiv vieler Atome durch ihre Halbwertszeit festgelte Lebensdauer haben und dann einzeln und unabhängig voneinander wieder in den Grundzustand übergehen. Die Atome sind deshalb stabil, weil der Grundzustand ihrer Wellenfunktion stabil ist, und sie aus angeregten Zuständen immer wieder dahin zurückkehren..

Bei Atomen mit mehr als einem Proton im Kern ist es genauso. Man kann aber für komplexere Atome die Wellenfunktionen der Elektronen nicht mehr mit mathematischen Funktionen berechnen, sondern nur noch näherungsweise mit dem Computer.

Weiterführende Literatur "für Alle":

G. Dedié: *Die Kraft der Naturgesetze*, zweite Auflage, tredition 2015 ²

² https://www.amazon.de/Die-Kraft-Naturgesetze-Elementarteilchen-menschlichen/dp/3849579018/ref=sr_1_1?s=books&ie=UTF8&qid=1508570948&sr=1-1