

Florian Aigner

Warum wir nicht durch Wände gehen*

***unsere Teilchen aber schon**

Ein Reiseführer durch die Welt der Quanten

Glossar

Selbstverständlich handelt es sich hier nicht um ein vollständiges Wörterbuch der Quantenphysik – aber bei manchen Begriffen hilft es vielleicht, sie hier noch einmal mit ein paar kleinen Anmerkungen zu versehen.

Alphateilchen sind eine Kombination aus zwei *Protonen* und zwei *Neutronen*. Der Kern eines Heliumatoms ist ein solches Alphateilchen. Bestimmte radioaktive Atomkerne, die viel größer sind und aus viel mehr Protonen und Neutronen bestehen, können manchmal ein solches Alphateilchen ausspucken – das bezeichnet man dann als „Alphazerfall“.

Antiteilchen: Zusätzlich zu den *Elementarteilchen*, die wir kennen, gibt es auch noch sogenannte Antiteilchen. Sie haben dieselben Eigenschaften wie gewöhnliche *Teilchen*, allerdings entgegengesetzte elektrische Ladung. Das Antiteilchen des negativ geladenen *Elektrons*

zum Beispiel ist das positiv geladene Positron. Zu jedem *Quark* gibt es ein Antiquark. Wenn ein Teilchen auf sein Antiteilchen trifft, dann vernichten sie einander gegenseitig.

Atom: Ein Atom ist eine Kombination von einem *Atomkern* und *Elektronen*, die aneinandergebunden sind. Je nachdem, wie viele Protonen im Atomkern enthalten sind, kann man das Atom einem

bestimmten chemischen *Element* zuordnen. Das Atom besteht aus verschiedenen *Elementarteilchen*, die man alle als quantenphysikalische *Welle* betrachten kann. Man kann aber auch das ganze Atom als quantenphysikalische Welle betrachten. Beide Sichtweisen widersprechen einander nicht.

Atomkern: Der Atomkern besteht aus *Protonen* und *Neutronen*. Er ist somit immer positiv geladen – deshalb zieht er die negativ geladenen *Elektronen* an und hält sie fest.

Bellsche Ungleichung: John Stewart Bell veröffentlichte eine Ungleichung, die für Ergebnisse von Messungen an *Teilchen* immer gelten muss – falls der lokale Realismus stimmt. Falls also Teilchen einen definierten *Zustand* besitzen, auch wenn sie niemand beobachtet, und falls ein Ding ein anderes immer nur maximal mit Lichtgeschwindigkeit beeinflussen kann. Experimente zeigen aber: Diese Ungleichung ist verletzt. Daher kann der lokale Realismus nicht stimmen. Die *Quantentheorie* kann das erklären – sie geht über den lokalen Realismus hinaus. Die Verletzung der Bellschen Ungleichung ist somit ein Beweis dafür, dass die Quantentheorie nicht nur eine unnötige Verkomplizierung der Dinge ist, sondern dass man tatsächlich eine Theorie mit all den Merkwürdigkeiten der Quantentheorie benötigt, um die Welt zu erklären. (Streng

genommen gibt es mehrere verschiedene Formulierungen dieser Ungleichung – man spricht daher auch manchmal von „den Bellschen Ungleichungen“.)

Bohrsches Atommodell: Nach dem Atommodell von Niels Bohr kann man sich das *Atom* so ähnlich vorstellen wie ein Mini-Sonnensystem – mit dem *Atomkern* in der Mitte, der von *Elektronen* umkreist wird.

Aufgrund der *Wellennatur* der Elektronen sind nur ganz bestimmte Elektronen-Kreisbahnen erlaubt, alles dazwischen ist unmöglich. Das ist allerdings ein sehr vereinfachtes Bild. In Wirklichkeit umgeben die Elektronen den Atomkern als wellige Elektronenwolke. Niels Bohr konnte mit seinem vereinfachten Atommodell allerdings erklären, warum Elektronen im Atom nur ganz bestimmte Energiezustände einnehmen können – warum die Energie der Elektronen im Atom also *quantisiert* ist.

Differentialgleichung: Aus der Schule kennt man Gleichungen, in denen Variablen vorkommen – zum Beispiel $x+5=7$. Die kann man lösen, dann kommt für x eine Zahl heraus. Es gibt aber auch Gleichungen, deren Lösung nicht einfach nur eine Zahl ist, sondern eine Funktion – also so etwas wie „Sinus von x “ oder „ x zum Quadrat“. Die Form dieser Funktion wird dann oft nicht nur mit einfachen Rechenoperationen wie dem „Plus“ im obigen Beispiel festgelegt, sondern auch durch Differenzialoperatoren: $f'(x)=f(x)$ zum Beispiel ist eine Differentialgleichung. Dabei steht $f'(x)$ für die Funktion f , aber differenziert nach der Variablen x . Und wenn man das macht, soll die Funktion f selbst herauskommen. (Diese Differentialgleichung wird zum Beispiel durch die einfache Exponentialfunktion e hoch x gelöst). Die *Schrödingergleichung* ist eine solche Differentialgleichung – als Ergebnis liefert sie die *Wellenfunktion*.

Drehimpulserhaltung: Wenn sich etwas dreht, dann hat es die Tendenz, diese Drehung beizubehalten – das bezeichnet man als „Drehimpulserhaltung“. Wenn wir die Drehung eines Objekts verändern wollen,

dann müssen wir eine Kraft aufwenden (oder präziser gesagt: ein Drehmoment – eine Kraft, die in einem bestimmten Abstand zur Drehachse wirkt). Ohne äußere Kräfte (also auch ohne Reibungskraft) dreht sich ein Objekt für immer.

Elektron: Negativ geladenes *Elementarteilchen*. Weil es viel weniger Masse hat als *Protonen*, *Neutronen* oder gar ganze *Atome*, ist die *Wellenlänge* des Elektrons vergleichsweise groß. Daher ist es vergleichsweise einfach, die *Welleneigenschaften* von Elektronen zu studieren.

Element: Ein chemisches Element ist eine bestimmte Sorte von *Atomen*. Zu welcher Sorte ein bestimmtes Atom gehört, wird durch die Anzahl seiner *Protonen* bestimmt: Wenn es genau sechs Protonen hat, ist es ein Kohlenstoffatom. Wenn es genau sieben Protonen hat, ist es ein Stickstoffatom – und so weiter. Zusätzlich haben diese Atome auch noch *Neutronen* – oft ist (zumindest bei kleineren Atomen) ihre Zahl ähnlich groß wie die Zahl der Protonen: Die häufigste Kohlenstoff-Variante enthält sechs Neutronen, die häufigste Stickstoff-Variante enthält sieben Neutronen.

Aber wenn ein Atom sieben Protonen und acht Neutronen enthält (auch das kommt vor), ist es immer noch ein Stickstoff-Atom. Zusätzlich enthalten Atome natürlich auch noch *Elektronen* – wenn die Zahl der negativ geladenen Elektronen genau der Zahl der

positiv geladenen Protonen entspricht, dann ist das Atom insgesamt elektrisch neutral. Andernfalls ist es insgesamt elektrisch geladen, in diesem Fall spricht man von einem Ion.

Elementarteilchen sind die fundamentalen Bausteine der *Materie* – also all jene *Teilchen*, die nicht aus noch kleineren Teilchen zusammengesetzt sind. *Elektronen* und *Photonen* sind Elementarteilchen. *Protonen* und *Neutronen* nicht – sie bestehen aus *Quarks*. *Atome* und noch größere Dinge sind natürlich erst recht keine Elementarteilchen.

Interferenz: Wenn sich zwei *Wellen* miteinander überlagern (oder eine Welle sich mit sich selbst überlagert), spricht man von Interferenz. Die Maxima und Minima (Wellenberge und Wellentäler) der Welle können sich an bestimmten Stellen addieren oder einander gegenseitig auslöschen. Das ist eine Eigenschaft, die alle Wellen haben – aber eben nur Wellen. Ein Fahrkartenkontrolleur kann sich nicht mit einem anderen Fahrkartenkontrolleur lokal verstärken oder auslöschen. Ein Fahrkartenkontrolleur ist daher keine Welle.

Katze: Lebendiges, makroskopisches Objekt, das von Erwin Schrödinger moralisch höchst verwerflichen Experimenten ausgesetzt wurde – zum Glück aber nur rein theoretisch, als Gedankenexperiment. Eine Katze ist deutlich schwerer als ein *Atom*, daher hat sie eine extrem kurze *Wellenlänge*. Katzen-*Interferenzmuster* sind daher experimentell nicht zu realisieren. Katzen gehorchen daher prinzipiell der klassischen Physik. Bei näherer Betrachtung stellt sich allerdings heraus: Sie gehorchen eigentlich überhaupt niemandem. Und das ist vermutlich auch gut so.

Kernteilchen (oder auch Nukleon) ist eine Bezeichnung für die *Teilchen*, aus denen der *Atomkern* besteht – nämlich *Protonen* und *Neutronen*.

Kopenhagener Deutung: Die Kopenhagener Deutung ist eine Interpretation der *Quantentheorie*, die akzeptiert, dass der Zufall ein unverrückbarer Bestandteil der Quantentheorie ist.

Dass die Ergebnisse von Experimenten nicht unbedingt exakt vorhergesagt werden können, sondern manchmal nur Wahrscheinlichkeiten für bestimmte mögliche Messergebnisse berechnet werden können, ist keine Unvollkommenheit der Quantentheorie – nach der Kopenhagener Deutung ist das einfach eine Eigenschaft der Wirklichkeit, mit der man sich abfinden muss.

Licht ist elektromagnetische Strahlung. Sie breitet sich wellenartig aus, hat aber gleichzeitig auch Teilcheneigenschaften. Manche Leute verwenden den Begriff „Licht“ nur für sichtbares Licht – also für elektromagnetische Strahlung mit einer Wellenlänge, die unser menschliches Auge wahrnehmen kann. Aus physikalischer Sicht gibt es aber keinen guten Grund, mit diesem Begriff so streng zu sein, insofern kann man das Wort „Licht“ durchaus auch für elektromagnetische Strahlung verwenden, die eine zu große oder eine zu kleine Wellenlänge hat, um von uns gesehen werden zu können. Mikrowellen oder auch Röntgenstrahlen beispielsweise sind, so betrachtet, also

„unsichtbares Licht“.

Materie ist alles, was aus *Teilchen* besteht und Masse hat. *Licht* wird nicht als Materie gesehen, denn *Photonen* sind masselos. *Elektronen, Neutronen, Protonen* und alles, was daraus besteht, ist hingegen Materie.

Messung: Bei einer Messung kommt das Ding, das wir vermessen (zum Beispiel ein *Quantenteilchen*) in Kontakt mit etwas Großem – zum Beispiel mit einem Messgerät. Und damit in weiterer Folge auch mit dem Labor, in dem das Messgerät steht, und vielleicht mit einem Menschen, der das Ergebnis vom Messgerät abliest. Wenn man ein Quantenteilchen misst, dann gerät es zwangsläufig in Kontakt mit der Welt der großen Dinge. Daher spielen in diesem Fall für das Teilchen plötzlich auch die Regeln eine Rolle, die in der Welt der großen Dinge gelten: Es kann sich im Augenblick nach der Messung nicht mehr in einem *Überlagerungszustand* befinden. Vor der Messung kann das Teilchen unterschiedliche messbare Zustände gleichzeitig miteinander vereinen – es kann sich zum Beispiel an unterschiedlichen Orten gleichzeitig aufhalten oder sich in unterschiedliche Richtungen gleichzeitig bewegen. Die Messung allerdings zwingt das Teilchen, sich für ein mögliches Messergebnis zu entscheiden. Sein *Zustand* wird festgelegt und dadurch verändert.

Molekül: Wenn sich mehrere *Atome* miteinander verbinden, bilden sie ein Molekül. Moleküle gibt es in ganz unterschiedlichen Größen – vom simplen Wasserstoffmolekül H_2 , das einfach nur aus zwei Wasserstoffatomen besteht, bis hin zu riesengroßen Makromolekülen, die aus vielen tausend Atomen bestehen. Prinzipiell kann man Moleküle (wie grundsätzlich alles) als *Welle* beschreiben. Man kann zum Beispiel Wasserstoffmoleküle durch einen Doppelspalt schießen und sich *Interferenz-Phänomene* ansehen. Sogar mit großen Molekülen, bestehend aus 60 Kohlenstoffatomen, ist das bereits gelungen. Allerdings gilt: Je größer das Objekt, umso kleiner seine *Wellenlänge* – und umso schwieriger wird es, irgendwelche *Welleneigenschaften* nachzuweisen. Bei großen Molekülen (oder noch größeren Dingen) kann man Welleneigenschaften daher meistens getrost ignorieren.

Ein Fußball ist immer entweder im Tor oder nicht. Man muss sich in diesem Fall über Wellenüberlagerungsphänomene keine Gedanken machen.

Neutron: Ein *Kernteilchen* ohne elektrische Ladung. Es besteht aus drei *Quarks*.

Photon: Photonen sind *Lichtteilchen* oder *Lichtquanten* – also die fundamentalen Bausteine des Lichts. Photonen haben keine Masse, sie bewegen sich immer mit Lichtgeschwindigkeit. Sie haben eine *Wellenlänge* und eine *Polarisationsrichtung*.

Polarisation: Man kann sich *Licht* als *Welle* vorstellen, die in einer bestimmten Richtung schwingt. Die Polarisationsrichtung gibt die Ebene an, in der diese Schwingung stattfindet. Licht hat aber auch *Teilcheneigenschaften* – es besteht aus einzelnen *Photonen*. In dieser Sichtweise ist die Polarisierung die *Spinrichtung* der Photonen.

Plancksches Wirkungsquantum: Das Plancksche Wirkungsquantum (meist

abgekürzt mit dem Buchstaben h) ist die wohl wichtigste Naturkonstante in der *Quantentheorie*. Es kommt in fast allen wichtigen Formeln der Quantentheorie vor – oft in der Form „ $h/2\pi$ “. Damit die Formeln einfacher aussehen, hat man sich daher für $h/2\pi$ einen eigenen Buchstaben ausgedacht – nämlich \hbar (das manchmal auch „reduziertes Plancksches Wirkungsquantum“ genannt wird. Oft hört man aber auch einfach nur „Plancksches Wirkungsquantum“, wenn eigentlich nicht h , sondern \hbar gemeint ist. Auch in der Physik drückt man sich nicht immer ganz präzise aus. Es ist ein Jammer.) h ist das Verhältnis aus Energie und Frequenz eines *Photons* ($h=E/f$), \hbar kommt in der *Schrödingergleichung* vor, auch den *Spin* von *Teilchen* misst man in Einheiten von \hbar .

Proton: Ein *Kernteilchen* mit positiver elektrischer Ladung. Es besteht aus drei *Quarks*.

Quanten: Quanten sind streng genommen einfach nur Portionen von etwas: *Licht* ist zwar wellig, kommt aber immer in bestimmten Portionen vor – in *Photonen*. Photonen sind also Lichtquanten. Wenn ein *Elektron* im *Atom* von einem *Zustand* höherer Energie auf einen Zustand niedrigerer Energie wechselt, kann es ein Photon abgeben – einen Energiequant.

Quantenfeldtheorie ist eine Erweiterung der klassischen *Quantenmechanik*, in der jede *Teilchensorte* als „Feld“ beschrieben wird, das unser gesamtes Universum ausfüllt – ähnlich wie man die Temperatur in einem Raum beschreiben kann, indem man ein „Temperaturfeld“ definiert, das jedem Punkt im Raum eine bestimmte Temperatur zuweist, oder wie man den Wind beschreiben kann, indem man ein „Windströmungsfeld“ definiert, das jedem Punkt im Raum eine Windstärke und eine Windrichtung zuweist. Mithilfe der Quantenfeldtheorie kann man auch Prozesse berechnen, bei denen Teilchen zerstört, erzeugt bzw. ineinander umgewandelt werden.

Quantenphysik/Quantentheorie/Quantenmechanik

Diese Begriffe sind nicht immer scharf zu trennen. Quantenphysik ist ganz allgemein jener Bereich der Physik, der sich mit all dem befasst, worum es in diesem Buch geht – mit *Wellen* und *Teilchen*, mit *quantisierten* Größen. Grundsätzlich besteht Physik aus Theorie und Experiment – innerhalb der Quantenphysik gibt es also *Quanten-Experimente* und die *Quantentheorie* (die theoretische Grundlage dieser Experimente). Manchmal wird zwischen *Quantenmechanik* und *Quantenfeldtheorie* unterschieden: Die *Quantenmechanik* beschreibt das wellige Verhalten von *Teilchen* – etwa mithilfe der *Schrödingergleichung*. Die *Quantenfeldtheorie* ist noch etwas allgemeiner.

Quantenschwubbel ist ein frei erfundenes Wort, das es bisher noch nicht gab. Das ist ein Vorteil – denn dann kann man selbst beschließen, was es bedeuten soll. Es soll den wackelig-welligen Charakter der *Materie* zum Ausdruck bringen.

Quantenteilchen: Ein informeller Begriff, der ausdrücken soll, dass es sich um ein *Teilchen* handelt, das mit den Regeln der *Quantentheorie* beschrieben werden muss – im Gegensatz etwa zu einem Zwiebackbrösel, den man eventuell auch als „Teilchen“

bezeichnen kann, der mit Quantentheorie aber nichts zu tun hat.

Quantenverschränkung: Wenn zwei oder mehrere *Teilchen* quantenverschränkt sind, dann bedeutet das: Man kann zwar genau sagen, in welchem Zustand sie sich gemeinsam befinden, aber daraus folgt nicht, dass jedes einzelne Teilchen deshalb einen wohldefinierten Zustand hat. Man kann zum Beispiel zwei *Atome* so verschränken, dass feststeht: Eines befindet sich im Zustand „Spin up“, eines im Zustand „Spin down“. Damit ist der *Spin* des Gesamtsystems der zwei Atome exakt und eindeutig beschrieben. Trotzdem kann sich jedes der beiden Atome in einem *Überlagerungszustand* von „Spin up“ und „Spin down“ befinden. Wissen über das Gesamtsystem bedingt nicht Wissen über seine Einzelteile. Das bedeutet aber auch: Wenn eines der Teilchen gemessen wird, ist damit auch augenblicklich der Zustand des anderen Teilchens festgelegt. Quantenverschränkte Teilchenpaare sind gewissermaßen ein einziges, gemeinsames Ding, auch wenn sich die beiden Teilchen an völlig unterschiedlichen Orten aufhalten.

Quantisierung: Wenn eine physikalische Größe quantisiert ist, dann kann sie nur ganz bestimmte Werte annehmen. Die Energie eines *Elektrons* im *Atom* ist zum Beispiel quantisiert. Es gibt ganz bestimmte Energiewerte, die für das Elektron erlaubt sind, alle Werte dazwischen sind physikalisch einfach nicht möglich.

Quark: Quarks gehören zu den *Elementarteilchen*. Aus „Up-Quarks“ und „Down-Quarks“ sind *Protonen* und *Neutronen* aufgebaut. (Die Namen haben keinerlei Bedeutung – mit „Spin up“ oder „Spin down“ zum Beispiel hat das überhaupt nichts zu tun).

Schrödingergleichung: Die Schrödingergleichung ist eine *Differentialgleichung*, mit der man eine *Teilchenwelle* beschreiben kann. Sie sagt uns, welche Teilchenwellen in einer bestimmten Situation (unter Anwesenheit ganz bestimmter Kräfte von außen – z. B. unter Anwesenheit eines *Atomkerns*) möglich sind und wie diese Teilchenwellen aussehen. Sie sagt uns auch, wie sich diese Teilchenwelle im Lauf der Zeit verändert: Wenn wir die Teilchenwelle zu einem bestimmten Zeitpunkt kennen, dann können wir mithilfe der Schrödingergleichung genau sagen, wie sich diese *Welle* in weiterer Folge entwickeln wird.

Spin: Der Eigendrehimpuls der *Teilchen*. Oft wird er mit der Eigenrotation eines Planeten verglichen – das ist aber nicht unbedingt ein hilfreiches Bild.

Wichtig ist: Der Spin eines Teilchens hat eine Richtung: Wenn man die Spinrichtung eines Spin- $\frac{1}{2}$ -Teilchens misst, dann gibt es nur zwei verschiedene mögliche Ergebnisse – man kann sie „Spin up“ oder „Spin down“ nennen. Das Ergebnis hängt aber davon ab, in welche Richtung man das Messgerät dreht: Ein „Spin up“-Teilchen, gemessen entlang der x-Achse, befindet sich in Bezug auf eine andere Achse in einem *Überlagerungszustand*. Welches Ergebnis wir erhalten, wenn wir die Spinrichtung dieses Teilchens in Richtung der y-Achse oder der z-Achse messen, ist dann purer Zufall.

Standardmodell der Teilchenphysik: Das Standardmodell ist das heute weithin

akzeptierte Modell der *Elementarteilchen*. Es beinhaltet unterschiedliche *Teilchen* und die Kraftwirkungen zwischen ihnen. Es ist ungeheuer erfolgreich und kann viele Phänomene extrem genau beschreiben – allerdings: Die Gravitation kommt in diesem Standardmodell nicht vor. Die Teilchenphysik mit der Gravitation zu verknüpfen ist bis heute nicht auf zufriedenstellende Weise gelungen. Hier kann man sich ganz sicher noch den einen oder anderen Nobelpreis abholen.

Teilchen ist ein Wort für einen Baustein der *Materie*, um dessen Struktur man sich gerade nicht kümmern möchte. Die fundamentalen Bestandteile der Materie sind *Elementarteilchen* – doch oft bezeichnet man auch Dinge als „Teilchen“, die aus mehreren Elementarteilchen bestehen, zum Beispiel *Protonen*, *Atome* oder sogar größere Dinge. Jedes Teilchen hat zugleich auch *Welleneigenschaften* – man verwendet das Wort „Teilchen“ hauptsächlich dann, wenn die Welleneigenschaften keine wichtige Rolle spielen, sondern die *Teilcheneigenschaften* im Vordergrund stehen.

Teilcheneigenschaften: Ein *Teilchen* ist eine *Materie*-Portion. Von „halben Teilchen“ zu sprechen, ergibt keinen Sinn – Teilchen kommen immer nur in ganzen Zahlen vor. Außerdem nimmt man von einem Teilchen typischerweise an, dass es sich ganz teilchenhaft zu jedem Zeitpunkt an einem ganz bestimmten Ort befindet – doch das ist bei näherer Betrachtung eben nicht ganz richtig, weil jedes Teilchen auch *Welleneigenschaften* hat.

Teilchenwelle oder Wellenteilchen sind Begriffe, mit denen die Doppelnatur der *Materie* illustriert werden soll: Jedes *Teilchen* ist auch eine *Welle*, jede *Welle* ist (oder besteht aus) Teilchen.

Überlagerungszustand: Einer der wichtigsten Grundsätze der *Quantentheorie* lautet: Wenn sich etwas in mehreren verschiedenen *Zuständen* befinden kann, dann kann es sich auch in einer Mischung dieser Zustände befinden. Wenn also ein *Teilchen* zum Beispiel nach rechts oder nach links fliegen kann, dann kann es auch gleichzeitig nach rechts und nach links fliegen. Solche Zustände bezeichnet man als Überlagerungszustand.

Allerdings lässt sich nicht ganz genau definieren, ob sich ein Teilchen in einem solchen Überlagerungszustand befindet oder nicht. Das ist Ansichtssache. Es hängt davon ab, welche Messung wir durchführen: Es kann sein, dass ein *Teilchen* einen eindeutig definierten Zustand bezüglich einer möglichen Messung hat – bezüglich eines anderen Messapparates befindet es sich aber gerade in einem Überlagerungszustand.

Verborgene Variablen: Wenn die *Kopenhagener Deutung* der *Quantentheorie* sagt, dass die Ergebnisse eines Experiments manchmal einfach Zufall sind – wie kann man das sicher wissen? Könnte es nicht sein, dass die Natur das Ergebnis des Experiments für sich trotzdem irgendwie schon festgelegt hat, wir Menschen aber bloß nicht wissen, wo und wie? Derart verborgene, aber bereits festgelegte Größen nennt man „verborgene Variablen“. Die *Bellsche Ungleichung* zeigt allerdings: Entweder gibt es solche verborgenen Variablen nicht, oder es handelt sich jedenfalls um recht merkwürdige verborgene Variablen, die in gewissem Sinn noch mehr Verwirrung stiften, als sie auflösen. Das Konzept „verborgener Variablen“ ist daher nicht hilfreich.

Welle: Eine Welle ist eine Schwingung, die sich ausbreiten kann. Sie hat bestimmte *Welleneigenschaften*.

Welleneigenschaften: Jede *Welle* hat bestimmte Eigenschaften – etwa eine Wellenlänge und eine Frequenz. Eine ganz besonders wichtige Eigenschaft von Wellen ist ihre Fähigkeit zur *Interferenz*.

Wellenfunktion: Die Wellenfunktion ist die mathematische Beschreibung einer *Teilchenwelle*. So wie die Funktion „Sinus von x“ jedem x eine Zahl zuweist, weist auch die Wellenfunktion jedem Punkt eine Zahl zu – allerdings eine komplexe Zahl, auch i, die Wurzel aus minus eins, darf vorkommen. Die Wellenfunktion allein sagt uns noch nicht viel. Wenn wir allerdings das Quadrat der Wellenfunktion ausrechnen und davon den Betrag nehmen, dann bekommen wir eine reelle Zahl (in der die Wurzel aus minus eins also nicht mehr vorkommt). Und diese reelle Zahl ist ein Maß

dafür, wie sehr sich das *Teilchen* an dieser Stelle befindet – wie groß also die Wahrscheinlichkeit ist, das Teilchen bei einer Messung genau dort aufzuspüren.

Wellenlänge: Der Abstand zwischen zwei Wellenbergen – oder zwischen zwei Wellentälern. Das ist dasselbe – zumindest bei einer regelmäßigen, periodischen *Welle*. Eine kleinere Wellenlänge bedeutet höhere Energie, eine größere Wellenlänge bedeutet niedrigere Energie.

Zustand: Der Quantenzustand eines *Teilchens* ist die Gesamtheit seiner Eigenschaften, die es zu einem bestimmten Zeitpunkt hat. Es gibt Zustände, die gemessen werden können – die das Teilchen also im Augenblick nach einer Messung einnehmen kann. Wenn gerade nicht gemessen wird, kann sich das Teilchen auch in einer Kombination solcher messbaren Zustände (einem *Überlagerungszustand*) befinden.