

Begleitheft

Kinderuni Saar

Vorlesungsreihe zum Thema „Quanten“

Thema: „Ist der Mond auch da, wenn keiner hinschaut?“

Referent: Prof. Dr. Christoph Becher

Kinderuni – dieses Semester mal ganz anders!

Normalerweise finden die Vorlesungen der Kinderuni immer im Audimax der Universität des Saarlandes statt. Aufgrund der Corona-Pandemie sind weder Besucher auf dem Campus zugelassen, noch dürfen Veranstaltungen stattfinden. Daher haben wir uns überlegt, wie wir dennoch eine Kinderuni anbieten können. Wenn die Kinder schon nicht zu uns kommen können, dann kommen wir zu ihnen! Dies tun wir über den Weg der Schulen, was dem Ganzen ein besonderes Flair verleiht.

Worum geht es in diesem Semester?

Hast du Lust, mit uns in eine Welt einzutauchen, in der alles ein wenig anders zu sein scheint? Dann bist du bei unserer Kinderuni im Sommersemester 2021 genau richtig! Denn dort befassen wir uns mit den sogenannten *Quanten*. Das sind kleinste Teilchen, die so winzig sind, dass du sie mit dem bloßen Auge gar nicht sehen kannst. Und auf der Ebene – also der „Welt“ dieser *Quanten* – ist alles ein wenig anders!

- Kannst du dir vorstellen, dass Teilchen sich scheinbar anders bewegen, wenn sie beobachtet werden?
- Und dass Teilchen gleichzeitig an verschiedenen Orten sein können?
- Oder dass diese Teilchen gar keine Teilchen, sondern Wellen sind?

Mit solchen Fragen beschäftigt sich die sogenannte *Quantenphysik*, also ein Teilgebiet der Naturwissenschaft *Physik*, das speziell Quanten untersucht.

Für dich haben wir Wissenschaftler zur Kinderuni eingeladen, die dir diese Fragen beantworten können. Also, wenn du Antworten auf diese Fragen haben möchtest, schau dir die Videos der Kinderuni zum Thema *Quanten* an.

Wir freuen uns auf dich!

Worum geht es in der Vorlesung?

Prof. Dr. Christoph Becher, Physiker an der Universität des Saarlandes, hält im Rahmen der Kinderuni-Vorlesungsreihe „Quantenwelten“ im Sommersemester 2021 eine Vorlesung zur Frage „Ist der Mond auch da, wenn keiner hinschaut?“.

Ausgangspunkt:

Leitmotiv der Vorlesung ist die Frage von Albert Einstein: „Ist der Mond auch da, wenn keiner hinschaut?“. Diese Frage ist nicht unbedingt wörtlich zu verstehen, denn wir wissen – oder *glauben zu wissen* –, dass der Mond immer da ist, auch wenn in einem Moment keiner von den vielen Milliarden Menschen auf der Erde hinschaut. Im Kern geht es um die Frage: Existiert ein Gegenstand, oder hat er eine bestimmte Eigenschaft, auch wenn seine Existenz oder seine Eigenschaft aktuell nicht bestimmt wurden, z. B. durch die Messung der Eigenschaft? In der Physik nennt man diese Annahme *Realismus*: Wir nehmen an, ein Gegenstand besitzt eine Eigenschaft (Ort, Geschwindigkeit o. Ä.), auch wenn wir sie nicht gemessen haben. In der Erfahrungswelt unseres Alltags ist dies eine vernünftige Annahme, denn wir finden sie immer wieder bestätigt: Ein Fußball liegt z. B. am Elfmeterpunkt, wenn die Kamera uns ein Bild davon zeigt; wenn der*die Fußballspieler*in dagegen tritt, fliegt der Ball mit einer gewissen Geschwindigkeit. Wenn der Vorgang wiederholt wird (Ball liegt genau auf dem gleichen Punkt, Spieler*in läuft mit der gleichen Geschwindigkeit an und trifft den Ball unter genau dem gleichen Winkel), dann passiert wieder genau dasselbe und der Ball fliegt in die gleiche Ecke des Tores. Wir nehmen aber auch an, dass der Ball die Eigenschaft *Geschwindigkeit* hat, wenn er gerade nicht von einer Kamera gefilmt wird und wenn gerade keiner der Zuschauer*innen hinsieht.

In der Quantenphysik, also bei der Beschreibung der kleinsten Teilchen (z. B. Atome, Elektronen, einzelne Lichtteilchen etc.), ist dies anders: Wir können einem Teilchen eine Eigenschaft wie Ort oder Geschwindigkeit erst zuweisen, *nachdem* wir eine Messung dieser

Eigenschaft durchgeführt haben. In anderen Worten: Ohne Hinschauen geht hier gar nichts! Auch mit der Wiederholung eines Vorgangs oder eines Experiments gibt es Unterschiede: Wenn wir statt eines Fußballs ein Atom „schießen“, dann kommt eine Zufallskomponente ins Spiel – das Atom wird nicht immer in dieselbe Ecke des Tores fliegen (auf den gleichen Punkt eines Detektors auftreffen), sondern seine Orte weisen eine gewisse Verteilung auf. Wir können nicht vorhersagen, auf welchen Punkt ein einzelnes Atom auftreffen wird; es könnte jeder beliebige Punkt auf dem Detektor sein. Nur wenn wir das Experiment oft wiederholen, wird das Atom oft an einem Punkt auftreffen, den wir auch im Alltagsexperiment erwarten, manchmal jedoch auch weiter davon entfernt. An dieser Stelle führt die Quantenphysik ein etwas schwer vorstellbares Konzept ein, die *Überlagerung gleichzeitiger Möglichkeiten*: Da wir nicht wissen, wo ein Atom auftreffen wird, bevor wir die Ortsmessung durchgeführt haben, müssen wir annehmen, dass sich das Atom *gleichzeitig an jedem Ort auf dem Detektor* befinden kann. Dies ist schwierig vorzustellen, da wir diese Erfahrung nicht aus unserem Alltag kennen: Der Fußball liegt nicht gleichzeitig am Elfmeterpunkt und im Tor.

Warum diese Effekte in der Quantenphysik so auftreten, können wir nicht sagen. Wir wissen aber aus vielen, immer wieder unabhängig wiederholten Experimenten, dass es so ist. Wir können diese Effekte mathematisch sehr genau beschreiben – die Übereinstimmung zwischen den theoretischen Vorhersagen und den experimentellen Ergebnissen gehören zu den besten in der ganzen Physik. Letztendlich können wir auch erklären, warum wir die Effekte der Quantenphysik im Alltag nicht sehen.

Die Vorlesung greift alle diese Konzepte in Form von Experimenten und Gedankenexperimenten auf. Letzteres ist notwendig, da Experimente in der Quantenphysik oft sehr komplex und aufwändig sind. Die Überlagerung gleichzeitiger Möglichkeiten lässt sich nur zeigen, wenn die einzelnen Quantenobjekte (Atome etc.) sehr gut von ihrer Umgebung isoliert werden.

Messung:

Wir zeigen, wie in der Physik eine Messung von Ort und Geschwindigkeit funktioniert: Einen Ort oder eine Entfernung bestimmt man durch Vergleich mit einem Maßstab, in unserem Video mit einem Zollstock. Die Geschwindigkeit misst man z. B. über die Zeit, die ein Wagen auf der Luftkissenbahn für das Zurücklegen einer vorher ausgemessenen Strecke benötigt. Die Zeit wird dabei durch zwei Lichtschranken und eine Stoppuhr gemessen.

Zufallsprinzip:

Den in der Quantenphysik „eingebauten“ Zufall veranschaulichen wir durch ein Gedankenexperiment. Da wir nicht vorführen können, wie wir ein Atom auf einen Detektor schießen, lassen wir eine Person zuerst ein Objekt aus der Alltagswelt und dann ein Quantenobjekt spielen, „Anna Alltag“ und „Anna Atom“. Für beide zeigen wir, dass wir ihre Geschwindigkeit messen können, genauso wie vorher durch zwei Lichtschranken. Das klassische Objekt „Anna Alltag“ finden wir nach dem „Abschießen“ dann immer am selben Ort im Hörsaal (die Sitzplätze sind die möglichen Auftreffpunkte eines Atoms auf dem Detektor), wie den Fußball in derselben Ecke des Tores nach Abschuss mit gleichem Anlauf und Winkel. Das Quantenobjekt „Anna Atom“ finden wir aber immer an verschiedenen Stellen im Hörsaal, mit einer *Zufallsverteilung*, bei der die Plätze in der Mitte (Erwartung aus dem Alltag) häufiger vorkommen als die Plätze am Rand.

Man könnte jetzt annehmen, dass die zufälligen Ergebnisse in der Quantenphysik auf mangelndes Geschick beim Experimentieren oder unzureichendes Design der Experimente zurückzuführen sind. Um zu zeigen, dass Zufall auch im Alltag eine Rolle spielt, zeigen wir Würfelexperimente: Auch hier ist nicht vorherzusagen, welche Augenzahl als Nächstes fallen wird. Wir erwarten aber nach vielen Wiederholungen, dass jede Augenzahl gleich häufig vorkommt. Weiterhin demonstrieren wir eine *Zufallsverteilung*: Wenn wir mit zwei Würfeln würfeln und die Augenzahlen zusammenzählen, sind nicht mehr alle Ereignisse gleich häufig,

denn manche Summen (z. B. die Sieben) kann man mit vielen Kombinationen erreichen ($1 + 6$, $6 + 1$, $2 + 5$, $5 + 2$, $3 + 4$, $4 + 3$) als andere (z. B. die Zwei: da gibt es nur $1 + 1$). Damit ergibt sich eine Verteilung von Möglichkeiten – genauso wie die Verteilung der Plätze von „Anna Atom“.

Überlagerung gleichzeitiger Möglichkeiten:

Die Annahme, dass ein Objekt an verschiedenen Orten gleichzeitig sein kann – oder allgemeiner: verschiedene Zustände gleichzeitig annehmen kann –, ist deutlich schwieriger zu veranschaulichen. Wir wählen das klassische Gedankenexperiment von Erwin Schrödinger: Eine Katze wird zusammen mit einem Mechanismus, der zu einem zufälligen Zeitpunkt ein tödliches Gift ausströmen lässt, in eine Kiste gesperrt. Solange der Deckel geschlossen ist (und wir auch kein Miauen der Katze hören können), wissen wir nicht, ob die Katze noch lebt oder der Mechanismus aktiviert wurde und die Katze bereits tot ist. Mathematisch gesehen müssen wir *vor einer Messung* ihres Zustandes annehmen, dass sie gleichzeitig lebendig und tot ist. Erst *im Moment der Messung* entscheidet sich das Schicksal der Katze und wir können ihren Zustand als *lebendig oder tot* bestimmen. Dies zeigt noch einmal das Messprinzip der Quantenphysik: Erst die Messung entscheidet über den Zustand eines Objekts.

Experimente zur Überlagerung gleichzeitiger Möglichkeiten:

Im Labor kann man Quantenobjekte, z. B. Atome, sehr gut von ihrer Umgebung isolieren – nur dann zeigen sie die ungewohnten Zustände gleichzeitiger Möglichkeiten. Zur Isolation benötigt man meistens ein gutes Vakuum, sonst stoßen sehr viele Luftteilchen mit dem Atom zusammen. Aus der Bahn der stoßenden Luftteilchen könnte man dann Rückschlüsse ziehen, an welchem Ort sich das Atom befindet, also eine Ortsmessung durchführen und der gleichzeitige Zustand wäre zerstört. Ebenso muss sich das Atom möglichst in Ruhe befinden, d. h. die Experimente müssen bei sehr tiefen Temperaturen durchgeführt werden. Wenn sich das Atom z. B. in einem Kristall befindet, wird es bei hohen Temperaturen (Zimmertemperatur

ist dabei schon sehr heiß!) von den anderen Atomen in seiner Umgebung gestoßen. Letztlich benötigt man noch eine Lichtquelle, in der Regel einen sehr stabilen Laser, um die Zustände des Atoms zu kontrollieren und das Atom in eine Überlagerung gleichzeitiger Zustände zu bringen.

Anwendungen:

Sowohl das Zufallsprinzip als auch das Prinzip der gleichzeitigen Möglichkeiten lassen sich für neuartige Anwendungen nutzen. Zufallszahlen werden in unserem Alltag z. B. benötigt, um Banküberweisungen zu verschlüsseln oder Glücksspiele im Internet zu steuern. Per Computer erzeugte Zufallszahlen sind für kritische Anwendungen aber oft nicht „zufällig genug“. Der Quantenzufall (z. B. „Auf welche Position trifft das Atom beim nächsten Experiment?“) auf der anderen Seite erzeugt jedoch nicht vorhersagbare Zufallszahlen. Seit diesem Jahr ist das erste Smartphone mit einem „Quanten-Chip“ auf dem Markt, der für abhörsichere Gespräche sorgen soll. Mit den gleichzeitigen Möglichkeiten auf der anderen Seite kann man rechnen: Ein Quantencomputer rechnet mit Überlagerungen, d. h. nicht mit den Bitwerten *0* oder *1* wie ein normaler Computer, sondern mit *0 und 1* gleichzeitig. Zwei Quantenobjekte (z. B. zwei Atome) können schon in vier gemeinsamen Überlagerungen präpariert werden (00 und 01 und 10 und 11); bei mehreren Objekten steigt diese Zahl schnell an. Damit rechnet ein Quantencomputer mit vielen Zahlen gleichzeitig statt nur mit einer Eingangszahl. Dieses parallele Rechnen schafft Geschwindigkeitsvorteile für bestimmte komplexe Probleme wie die Suche in Datenbanken, das Finden einer optimalen Verkehrsrouten, das Optimieren chemischer Reaktionen und viele mehr.

Der Mond:

Die Ausgangsfrage „Ist der Mond auch da, wenn keiner hinschaut?“ wird am Ende noch einmal aufgegriffen. Wäre der Mond ein Quantenobjekt, könnte er in einer Überlagerung von „er ist da“ und „er ist nicht da“ existieren und erst eine Messung („jemand muss hinschauen“)

entscheidet über seinen Zustand. Wir wissen aber aus unserer Erfahrung, dass der Mond immer da ist (selbst wenn wir ihn mal nicht sehen, weil gerade Neumond ist). Was ist also der Unterschied zwischen dem Mond und einem Atom? Das Atom zeigt die Überlagerung gleichzeitiger Möglichkeiten nur, wenn es gut von der Umgebung isoliert ist; der Mond jedoch steht in ständiger Wechselwirkung mit seiner Umgebung: Wir sehen sein Licht (genauer: das Sonnenlicht, das von ihm reflektiert wird) am Tag sowie – sogar noch besser bzw. einfacher – in der Nacht und wir bemerken seine Anwesenheit durch das Auftreten von Gezeiten (Ebbe und Flut). Wir haben somit, ohne eine direkte Messung („Anschauen“) gemacht zu haben, trotzdem Informationen über seine Anwesenheit. Dieser Fluss von Informationen macht den Unterschied und zerstört gleichzeitig die Überlagerung von gleichzeitigen Möglichkeiten.

Wie kann das Thema mit Kindern behandelt werden?

Das Thema *Quanten* ist komplex – vor allem für Kinder! Zugleich ist es aber sehr spannend, interessant und bietet eine Vielzahl an Lernchancen und -gelegenheiten. Aus diesem Grund sollen die folgenden Beispiele Impulse darstellen, wie das Thema mit Kindern (auch im Grundschulunterricht) behandelt werden kann.

Experimente für zu Hause:

In der Fragestunde zur Vorlesung haben wir einen Film eines Experiments gezeigt, in dem Lichtteilchen auf zufällige Positionen auf einem Detektor treffen, um das Zufallsprinzip noch einmal anhand eines realen Experiments zu demonstrieren. Ein solches Experiment ist einfacher mit Licht zu realisieren als mit Atomen. Man geht dabei von dem Prinzip aus, dass Licht, wenn es durch enge Öffnungen hindurchtritt, ein Muster erzeugt („Beugung“). Diese Muster haben wir in der Fragestunde gezeigt, in dem wir einen Laserpointer auf eine CD richten; dabei zeigt das reflektierte Licht eine Reihe von Punkten. Ähnliche Experimente kann man zu Hause machen: Man nimmt zwei Lego-Steine und presst sie so zusammen, dass nur ein kleinstmöglicher Spalt bleibt. Wenn man die Steine dicht vor das Auge hält und damit eine Lichtquelle (bitte nicht direkt in die Sonne schauen! der helle Himmel oder eine Lampe reichen auch) anschaut, sieht man farbige Streifen. Auch wenn man durch einen eng gewebten Vorhang auf eine Straßenlaterne (möglichst weit entfernt) schaut, kann man Muster sehen. Mit ein bisschen Phantasie findet man bestimmt noch mehr enge Öffnungen für Licht. Wenn man ein solches Beugungsexperiment mit einzelnen Lichtteilchen macht, kann man aufgrund des Zufallsprinzips wieder nicht vorhersagen, auf welche Stelle das nächste Lichtteilchen treffen wird. Wenn man das Experiment aber oft wiederholt, findet man wieder das aus dem Alltag bekannte Muster.