

Peter Tirler

Quantenmechanik für Nicht-Physiker*innen

Quantenmechanik ist mittlerweile aus der modernen Wissenschaft nicht mehr wegzudenken. Da sich die Grenzen des menschlichen Verständnisses der Natur immer weiter in die uns nicht unmittelbar zugänglichen Bereiche unserer Welt bewegen, wird es immer öfters notwendig, in einem Bereich zu arbeiten, wo die Dinge sehr klein sind: zu klein, um sie mit Methoden und Paradigmen zu beschreiben, die wir Menschen aus unserer makroskopischen Welt extrapolieren, aber genau dort, wo uns die Quantenmechanik hilft, dennoch Aussagen über die Natur zu treffen.

Gleichzeitig steht die Quantenphysik oft auch symbolhaft für den Teil der Wissenschaft, der nichtmehr rein durch Logik und Interesse greifbar ist, der nur von Spezialist*innen durchschaut werden kann, und der alles das erklären soll, was sich sonst nicht so einfach erklären lässt. So springt die Fachdisziplin zum Beispiel in Filmen ein, wenn die Sachverhalte für die Handlung zu kompliziert wären: in der Actionfilmreihe *Fast and Furious* wird bspw. ein Quantencomputer als MacGuffin eingesetzt, eingesetzt, wo keine genauere Erklärung gewünscht ist. Oder aber mit ihr wird unterstrichen, dass es sich um einen besonders komplizierten Fall handelt, wie im *Ghostbusters Reboot* von 2016, in dem eine Quantenphysikerin Teil des Teams ist und den Spuk plausibilisieren soll.

Meiner Meinung nach ist eine Mitursache für diese wahrgenommene Unnahbarkeit, dass Quantenmechanik in der Populärwissenschaft meist anhand von Beispielen und Vergleichen behandelt und beschrieben wird. Wie im Fall der *Heiligen Dreifaltigkeit* müssen Parallelen und Vereinfachungen als Erklärung und Vertröstung erhalten. Das eigentliche Konzept dahinter wird aber selten behandelt. Warum ist das so?

Quantenmechanik ist eine mathematische Theorie, und ohne Mathematik kann sie nicht vollständig besprochen oder erklärt werden. Wenn wir aber darauf bestehen, um leichter ein breiteres Publikum zu erreichen, können wir nur schwer über Vergleiche und Metaphern hinauskommen. Im Folgenden werde ich versuchen, Quantenmechanik mitsamt seiner theoretischen Grundlage so einzuführen, dass sie von einem fachlich sehr breit aufgestelltem PRO SCIENTIA-Publikum nachvollzogen werden kann.

Quantenmechanik entsteht, weil die Natur quantisiert ist

Schon seit Demokrit im antiken Griechenland gibt es die Idee, dass sich die Natur aus kleinen „unteilbaren“ Grundbausteinen zusammensetzt. Und auch wenn wir heute wissen,

dass selbst Atome gespalten werden können, so hat sich im frühen 20. Jh. langsam herauskristallisiert, dass nicht nur Materie, sondern jede physikalische Größe sich aus dem Vielfachen einer sehr kleinen „Grundeinheit“ zusammensetzt: so zum Beispiel Energie. Der Laserstrahl einer gewissen Farbe kann nicht jede beliebige Energie annehmen, sondern besitzt immer ein ganzzahliges Vielfaches einer „Grundenergie“, die von der Farbe desselben Strahles abhängt. Energie ist also „gequantelt“, oder „quantisiert“.

Ein nettes Beispiel hierfür sind Spülmitteltabs: Während ich glauben könnte, in meiner Verpackung befindet sich einfach Geschirrspülmittel, aus dem ich mir für jeden Waschgang so viel nehmen kann, wie ich will, sind viele Hersteller dazu übergegangen, eine gewisse Anzahl bereits „gequantelter“ Tabs herzustellen. Als Verbraucher*in kann ich also nur ein Vielfaches dieser Grundeinheit verwenden. Bei Geschirrspülern ist „genau eins“ aber meist schon die optimale Menge.

Diese Erkenntnis beeinflusst die Physik überall dort, wo die Größenskalen so klein werden, dass sich die Effekte dieser Quantisierung bemerkbar machen. Wenn ich den Wärmehaushalt eines Gebäudes plane, sind diese irrelevant da die Quantisierungsenergien Milliarden von Milliarden mal kleiner sind als mein Problem. Will ich aber den Grundzustand eines Atoms berechnen, treten sie auf. Und dort muss ich nun in all meinen Rechnungen und Modellen berücksichtigen, dass dieses Paradigma der Natur erfüllt sein muss. Wenn ein Modell der Natur, eine Vorstellung davon, wie sich Atome und Elektronen zueinander verhalten und „was sie sind“, diesen neuen Grundsatz verletzen, ist es meist einfach falsch und wird oft auch als „unphysikalisch“ bezeichnet.

Die Natur muss sich nicht immer so verhalten wie ein Fußball

Wir sind nun an einem Punkt angekommen, an dem wir uns überlegen müssen, wie wir uns die Objekte der Natur in diesen uns schwer zugänglichen, sehr kleinen Größenbereichen vorstellen und wie wir sie beschreiben. Wir wissen nur, dass alle Eigenschaften, die sie haben, quantisiert sein müssen, und wir wollen, dass jede Theorie, die wir aufstellen mit allen für uns Menschen messbaren Experimenten zusammenstimmt.

Als erstes stellt sich hierbei die „Teilchenfrage“: Kann ich zum Beispiel ein Elektron als Teilchen verstehen? Oder brauche ich eine Welle, um es zu beschreiben? Oder beides? Diese Fragen sind bereits etwas falsch gestellt. Wenn wir „Teilchen“ sagen, haben wir Vorstellungen, wie ein Teilchen zu sein und auszusehen hat. Wir nehmen Ideen aus unserer makroskopischen Lebensrealität und übertragen sie auf das Elektron. Es muss eine Masse haben, eine Position, eine Geschwindigkeit. Kurz: es ist so etwas wie ein Fußball in klein.

Für eine Welle gilt das gleiche: Elektronen und Atome sind aber für die Natur viel fundamentaler als Fußbälle. Unsere menschliche Intuition verlangt von uns, dass wir alle natürlichen Vorgänge relativ zu dem einordnen, was wir bereits gut kennen, und mit dem wir vertraut sind. Aber ALLES, was wir kennen, sind Phänomene, die erst dann entstehen, wenn sehr viele Grundteilchen zusammenwirken. Die einzelnen Grundobjekte der Natur müssen aber weder Teilchen noch Welle noch ein anderes Wort unserer Sprache sein, die

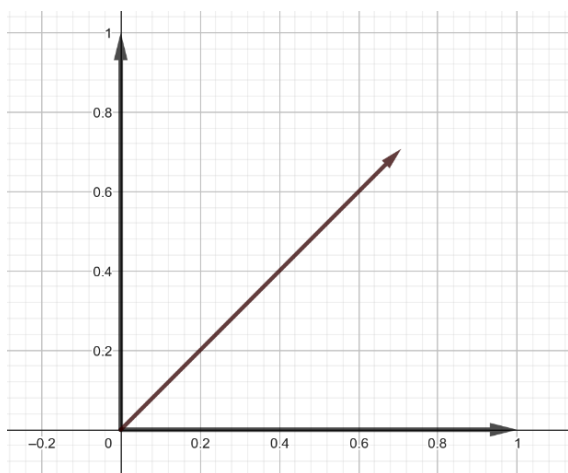
makroskopische Objekte beschreibt, und mit der bereits eine Vielzahl an Assoziationen unseres Alltags mitschwingen.

Was mache ich also? Ich beschreibe die Natur als mathematisches Objekt. Ich opfere die Möglichkeit, Intuition anzuwenden, für die Vorteile einer mathematischen Beschreibung, die genaue Aussagen trifft und klarstellt, wo ihre Grenzen sind.

Ich beschreibe die Natur als ein mathematisches Objekt. Basta.

Wenn dieser Schritt nun einmal gemacht ist, sieht die Situation wie folgt aus: Ich suche einen mathematischen Formalismus, aus dem ich alle von uns messbaren Experimente quantitativ herleiten kann. Sollte ich so einen finden, ist es mir dafür egal ob er „intuitiv“ oder „verständlich“ ist. Korrektheit ist besser.

Es stellt sich nun heraus, dass dies einfacher ist, als es sich vielleicht anhört, und eine Generation namhafter Physiker*innen hat diesen Formalismus schneller gefunden als man meinen würde. Heisenberg und Schrödinger sind hier nur zwei Namen, die sich ausgezeichnet haben.



In der modernen Quantenphysik ist jedes physikalische Objekt ein Vektor. Dies kennen einige vielleicht noch aus der Schule, und kann im einfachsten Fall dargestellt werden als eine Liste von Zahlen, im zwei und drei-dimensionalen Raum auch als eine Größe mit Betrag und Richtung, ein Pfeil sozusagen.

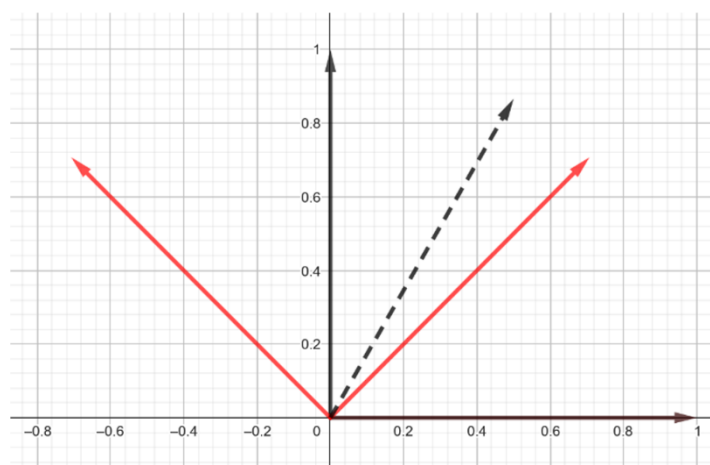
Bleiben wir als Beispiel beim zweidimensionalen Raum: Der (Vektor)Raum, in dem sich dieser Pfeil bewegt, ist der Raum aller möglichen Zustände. Die Koordinatenachsen sind die möglichen Ergebnisse einer Messung. Wenn mein Vektor nun also entlang einer dieser Achsen zeigt, werde ich in einer Messung immer das entsprechende Ergebnis bekommen. Zeigt er aber irgendwo in den Raum dazwischen, bekomme ich ein zufälliges Ergebnis. Alle Ergebnisse, „in deren Richtung“ der Vektor zumindest „ein bisschen“ (d.h. nicht orthogonal dazu) zeigt, sind möglich. Und je mehr mein Vektor in die Richtung einer Achse zeigt, desto wahrscheinlicher ist das entsprechende Ergebnis relativ zu allen anderen.

Der Rest folgt

Dies ist nun eine sehr schnelle, oberflächliche und nicht ganz allgemeine Einführung der Grundsätze der Quantenmechanik, aber für die allermeisten Konzepte reicht sie bereits aus. Viele Phänomene, die Quantenmechanik un-intuitiv machen, lassen sich an diesem Beispiel herleiten. Wir haben bereits gesehen, dass ein Objekt, z.B. ein Elektron, in einem Zustand

sein kann, in dem das Ergebnis einer Messung probabilistisch ist. Zeigt der Vektor mit 45° zu beiden Achsen, sind beide Messergebnisse gleich wahrscheinlich: nicht weil wir als Physiker*innen den Zustand nicht besser kennen, sondern weil die Natur einfach so funktioniert.

Wir können noch ein weiteres Beispiel anschauen: das Unschärfeprinzip (auch Komplementarität oder Unschärferelation). Wir wissen bereits, dass die Achsen meines Koordinatensystems meinen Messergebnissen entsprechen. Wir wollen diese mathematisch die „Basen“ des Vektorraumes nennen. Diese Koordinatenachsen sind aber keineswegs eindeutig. Niemand hindert mich daran, zwei weitere Vektoren zu zeichnen, die zueinander rechtwinklig sind, zu meinen ursprünglichen Achsen aber verschoben.



Diese neuen Vektoren sind in der obigen Abbildung rot eingezeichnet, während die ursprünglichen Vektoren in schwarz auf den Koordinatenachsen liegen. Diese neuen Vektoren sind auch, nicht weniger als die alten, eine valide Referenz für mein Koordinatensystem, aus denen ich jeden anderen Vektor aufbauen kann. Man sagt, sie sind auch eine Basis des Vektorraumes. Diese neue Basis entspricht nun einer anderen Messung. War die erste zum Beispiel die Position des Elektrons, kann diese neue Basis nun die Geschwindigkeit sein. Derselbe Zustand, der Zustand unseres Elektrons unter Beobachtung, kann nun sowohl in der einen, als auch in der anderen Basis gemessen werden. Ein jeder Vektor, wie der unterbrochene in der obigen Abbildung, kann nun in verschiedenen Basen gemessen werden. Rot oder Schwarz, Position oder Geschwindigkeit. Die Ergebnisse werden jeweils unterschiedlich sein.

Nun machen wir folgende Überlegung: Man stelle sich einen Vektor vor, der genau mit einem der beiden roten Basisvektoren übereinstimmt. Messe ich in der roten Basis der Geschwindigkeit, werde ich also immer dasselbe Ergebnis bekommen. Sagen wir mal immer den Geschwindigkeitswert „1“ und nie den Wert „0“. Ich kann also sagen, die Geschwindigkeit meines Elektrons ist genau bestimmt. Will ich nun aber die Position messen, liege ich genau zwischen den beiden Basisvektoren, deren Messergebnisse nun

gleich wahrscheinlich sind. In genau der Hälfte aller Messungen werde ich Position „0“ messen, in der anderen Hälfte Position „1“. Ist die Geschwindigkeit also genau bestimmt, kann ich über die Position keine Aussage machen. Man kann sich nun selbst überlegen, dass dieselbe Situation umgekehrt auftritt, wenn unser Zustand statt mit dem roten mit dem schwarzen Vektor übereinstimmt, also bereits „in der Positionsbasis“ liegt. Und genau das ist die bekannte Heisenberg'sche Unschärferelation. Sie besagt, dass es komplementäre Größen gibt, die nie gleichzeitig bestimmt werden können.

Abschluss

Es gibt noch vieles, über das man reden und nachdenken müsste. Was passiert, wenn wir mehr als nur zwei mögliche Ergebnisse pro Messung haben, als „0“ und „1“? Dann ist der Raum, in dem mein Vektor liegen kann, mehrdimensional. Er kann auch ohne Probleme unendlich-dimensional sein. Dann wird es schwierig, ihn aufzuzeichnen, und die Mathematik etwas technischer, aber das Prinzip funktioniert immer genau gleich. Was passiert, wenn ich mehrere Teilchen habe? Kann ich ihren gemeinsamen Zustand immer noch als „einen“ Vektor darstellen? Die Antwort ist ja, auch hier wird eine detaillierte Antwort aber komplizierter.

Zusammenfassend haben wir gesehen, dass Quantenmechanik sich dadurch ergibt, dass wir die Welt im Kleinen nicht mehr als Teilchen oder Welle beschreiben, sondern einfach als mathematischen Vektor, losgelöst von menschlicher Intuition. Und wir haben uns überlegt, wieso das notwendig ist. Wir haben keineswegs die Fülle der Quantentheorie durchgearbeitet, aber hoffentlich ist beim nächsten Mal, wenn Quantenmechanik besprochen wird, die Grundlage dafür da, vage und große Aussagen in ein sehr praktisches Nachdenken über die Natur und einen einfachen mathematischen Formalismus einordnen zu können.

Literaturverzeichnis

- Feynman, R. (2006). *The Feynman Lectures on Physics Vol. 3 (2nd ed.)*.
Griffiths, D. (2005). *An Introduction to Quantum Mechanics*. Pearson Prentice Hall.