

Einleitung

Wieso ich mit meinem Hund über Physik spreche Eine Einführung in die Quantenphysik

In der Nähe seines Tierheims hat der Mohawk-Hudson-Tierschutzbund einen kleinen Weg durch den Wald außerhalb von Troy angelegt, damit jemand, der einen Hund adoptieren will, diesen erst einmal spazieren führen kann. In einer kleinen Lichtung steht eine Bank am Wegrand. Ich setze mich darauf, und sehe mir die Hündin genauer an, die ich gerade an der Leine habe.

Sie setzt sich neben die Bank und stupst meine Hand mit ihrer Schnauze, also kraule ich sie zwischen den Ohren. Meine Frau und ich haben schon einen ganzen Haufen Hunde zusammen Gassi geführt, doch Kate musste arbeiten, deshalb habe ich das heute allein übernommen. Die hier scheint ganz gut zu passen.

Sie ist ein einjähriger Mischling aus einem deutschen Schäferhund und irgendetwas anderem. Ihr Fell hatte die typische schwarz-braune Zeichnung eines Schäferhunds, doch sie war zu klein und hatte Schlappohren. Das Schildchen auf ihrem Zwinger hatte mir ihren Namen verraten: „Princess“, aber das passte meiner Ansicht nach gar nicht.

„Was meinst du, Mädchen“, fragte ich sie, „wie sollen wir dich nennen?“

„Nenn mich Emmy!“, antwortete sie.

„Warum denn das?“

„Weil das mein Name ist, du Dummkopf.“

Von einem Hund „Dummkopf“ genannt zu werden, ist etwas ungewöhnlich, doch vermutlich hatte sie nicht ganz Unrecht. „Gut, dagegen lässt sich nichts einwenden. Wie sieht's denn aus? Willst du mitkommen und bei uns leben?“

„Na ja, das hängt ganz davon ab“, antwortete sie, „wie sind denn die Lebensbedingungen für ein Haustier bei euch?“

„Wie bitte?“

„Ich jage gerne. Gibt es bei euch etwas zu jagen?“

„Aber natürlich! Wir haben einen relativ großen Garten, da gibt es viele Vögel und Eichhörnchen und manchmal auch ein Häschen.“

„Oh, ich liebe Häschen!“ Sie wedelt mit dem Schwanz. „Und wie steht es mit Spaziergängen? Werde ich Gassi geführt?“

„Sicher doch!“

„Und Belohnungen? Ich liebe Belohnungen.“

„Die bekommst du, wenn du ein braver Hund bist.“

Sie schaut etwas beleidigt. „Ich bin ein sehr braver Hund! Du wirst mir also Belohnungen geben. Wie verdienst du dein Geld?“

„Wie bitte? Wer beurteilt hier eigentlich wen?“

„Ich muss schon wissen, ob du so einen tollen Hund wie mich überhaupt verdienst.“ Der Name „Princess“ war wohl doch passender, als ich zuerst gedacht hatte. „Also, wovon lebst du?“

„Nun ja, meine Frau Kate ist Rechtsanwältin, und ich bin Physikprofessor am Union College drüben in Schenectady. Ich lehre und forsche in den Bereichen Atomphysik und Quantenoptik.“

„Quanten-was?“

„Quantenoptik. Einfach ausgedrückt geht es um die Erforschung der Wechselwirkungen zwischen Atomen und Licht in Situationen, in denen man die Quantenphysik braucht, um eines oder beides davon zu beschreiben.“

„Das klingt kompliziert.“

„Das ist es auch. Aber es ist ein sehr spannendes Thema. Die Quantenphysik zeigt alle möglichen verrückten und wunderlichen Phänomene. Teilchen verhalten sich wie Wellen und Wellen wie Teilchen. Die Eigenschaften von Teilchen sind unbestimmt, bis man sie misst. Der leere Raum ist voll von ‚virtuellen Teilchen‘, die kurz entstehen und wieder verschwinden. Das ist wirklich cool.“

„Hmmm“, sie blickt nachdenklich, dann sagt sie: „Ein letzte Probe.“

„Welche denn?“

„Kraul mich am Bauch!“ Sie dreht sich auf den Rücken, und ich beuge mich zu ihr hinab und kraule ihren Bauch. Nach einer Minute steht sie wieder auf, schüttelt sich und sagt: „Gut, du bist ganz in Ordnung. Lass uns heimgehen.“

Wir gingen zum Tierheim zurück, um die Papiere für die Adoption auszufüllen. Auf dem Weg meinte sie: „Quantenphysik, puh! Ich werde etwas darüber lernen müssen.“

„Ich würde mich freuen, wenn ich es dir gelegentlich erklären dürfte.“

Wie die meisten Hundebesitzer verbringe ich viel Zeit damit, mit meinem Tier zu reden. Die meisten Konversationen laufen ziemlich klassisch ab: Friss das nicht! Runter vom Sofa! Lass uns Gassi gehen! Manche Gespräche aber gehen um Quantenphysik.

Warum ich mit meinem Hund über Quantenphysik spreche? Na ja, weil ich davon lebe: Ich bin ein Physikprofessor an der Universität. Und deshalb denke ich ziemlich viel über Quantenphysik nach.

Was ist nun Quantenphysik überhaupt? Es ist ein Teil der „modernen Physik“, das heißt, ihr liegen Gesetze zugrunde, die ungefähr ab dem Jahr 1900 entdeckt wurden. Physikalische Gesetze und Prinzipien, die vor 1900 entdeckt wurden, gehören zur „klassischen Physik“.

Die **klassische Physik** handelt von alltäglichen Gegenständen – Tennisbällen und Quietschspielzeugen, Öfen und Eiswürfeln, Magneten und elektrischen Leitungen. Alles, was man mit bloßem Auge sehen kann, wird von den klassischen Bewegungsgesetzen beherrscht. Die klassische Thermodynamik erklärt, welche physikalischen Phänomene hinter dem Heizen und Kühlen von Objekten stecken und wie Motoren und Kühlschränke funktionieren. Die klassische Elektrodynamik erklärt das Verhalten von Glühlampen, Radios und Magneten.

Die **moderne Physik** erklärt die seltsame Welt all dessen, was jenseits des Alltäglichen steckt. Die ersten Hinweise auf diese versteckte Welt kamen bei Experimenten zutage, die Ende des 19. / Anfang des 20. Jahrhunderts gemacht wurden und die sich mit den Gesetzen der klassischen Physik nicht erklären ließen. Es war nötig, dafür neue Gebiete mit neuen Gesetzen zu entwickeln.

Die moderne Physik gliedert sich in zwei Teilbereiche, die beide durch eine radikale Abkehr von den klassischen Vorstellungen gekennzeichnet sind. Der eine Bereich ist die Relativität. Sie handelt von Gegenständen, die sich sehr schnell bewegen oder sich in sehr starken Gravitationsfeldern befinden. Albert Einstein hat 1905 die Grundlagen für die Relativitätstheorie entwickelt. Es ist ein eigenständiges faszinierendes Gebiet, doch in diesem Buch werden wir uns nicht damit beschäftigen.

Über das andere Gebiet werde ich mich mit meinem Hund unterhalten: Die **Quantenphysik** oder **Quantenmechanik**¹ ist der Bereich der Physik, der sich mit Licht und sehr kleinen Teilchen beschäftigt, also mit Molekülen, Atomen und subatomaren Teilchen. Max Planck führte 1900 das Wörtchen „Quant“ ein, und Albert Einstein erhielt seinen Nobelpreis für die 1905 entwickelte erste Quantentheorie des Lichts.² Das ganze theoretische Gebäude der Quantenmechanik wurde in den rund 30 Jahren danach entwickelt.

Die Leute, die die Theorie entwickelt haben, sieht man alle zu Recht als „Titanen der Physik“ an. Zu ihnen gehören die frühen Pioniere, wie Planck und Niels Bohr, die sich das erste Quantenmodell des Wasserstoffatoms ausgedacht haben, und alle bis hin zu den späteren Visionären, wie Richard Feynman und Julian Schwinger, die unabhängig voneinander das entwickelt haben, was wir heute „Quan-

1 Die Begriffe „Quantenphysik“, „Quantentheorie“ und „Quantenmechanik“ sind mehr oder weniger austauschbar.

2 Die Erfindung der Relativitätstheorie kam nicht eben gut an. Deshalb war die offizielle Begründung für Einsteins Nobelpreis seine Quantentheorie des photoelektrischen Effekts (Seite 29).

ten-Elektrodynamik“ (QED) nennen. Manche Elemente der Quantentheorie sind sogar dem Wirkungsbereich der Physik entflohen und beschäftigen heute die Phantasie vieler Menschen, etwa die Unschärferelation von Werner Heisenberg, Schrödingers Katze und die Paralleluniversen von Hugh Everetts Viele-Welten-Interpretation.

Ohne Quantenmechanik wäre die moderne Welt kaum vorstellbar. Wir hätten niemals Halbleiterchips für Computer entwickeln können, wenn wir die Quanteneigenschaften des Elektrons nicht verstanden hätten. Es wäre unmöglich gewesen, Laser zu bauen, die heute für die Signalübertragung in Glasfaserkabeln unerlässlich sind, wenn wir nicht die Quanteneigenschaften des Lichts und der Atome verstanden hätten.

Doch die Auswirkungen, die die Quantenmechanik auf die Wissenschaft hat, gehen weit über rein praktische Fragen hinaus – sie zwingt die Physiker, philosophische Probleme anzupacken. Die Quantenphysik zieht die Grenzen, bis zu denen wir etwas über das Universum und die Eigenschaften der Objekte darin erfahren können. Die Quantenmechanik hat sogar unsere Auffassung darüber verändert, was es heißt, eine Messung durchzuführen. Sie hat uns gezwungen, die Natur der Realität auf einer ganz elementaren Ebene vollständig zu überdenken.

Die Quantenmechanik beschreibt eine vollkommen absonderliche Welt, wo nichts sicher ist und Objekte keine genau festgelegten Eigenschaften haben, bis wir sie messen. Es ist eine Welt, in der Gegenstände, die weit voneinander entfernt sind, auf eine seltsame Art und Weise miteinander verbunden sind, in der es direkt neben unserem eigenen ganze Universen gibt, die eine vollkommen andere Ge-

schichte durchlaufen haben, und in der „virtuelle Teilchen“ plötzlich im eigentlich leeren Raum auftauchen und wieder verschwinden.

Vielleicht klingt alles, was ich bisher über Quantenphysik geschrieben habe, ein wenig wie der Stoff für einen Fantasy-Film, doch es handelt sich um eine Wissenschaft. Die Welt, die die Quantenmechanik beschreibt, ist unsere eigene – nur auf einer mikroskopischen Skala.³ Die seltsamen Effekte, die die Quantenphysik vorhersagt, gibt es wirklich, und sie haben echte Auswirkungen und Anwendungen. Die Quantentheorie wurde mit einer unglaublichen Präzision überprüft. Sie wurde dadurch zur am genauesten getesteten Theorie in der Geschichte der Naturwissenschaften. Sogar ihre seltsamsten Vorhersagen wurden experimentell verifiziert (wie wir in den Kapiteln 7, 8 und 9 sehen werden).

Quantenphysik ist also ein klasse Thema. Doch was hat sie mit Hunden zu tun?

Im Vergleich zu Menschen haben Hunde bei der Beschäftigung mit Quantenphysik einen großen Vorteil. Sie gehen an die Erklärung der Welt mit weniger vorgefassten Meinungen heran und erwarten immer das Unerwartete. Ein Hund kann ein ganzes Jahr lang jeden Tag die gleiche Straße entlanggehen, doch für ihn wird es jeden Tag eine neue Erfahrung sein. Jeder Stein, jeder Busch, jeder Baum wird beschnüffelt, als wäre er noch nie beschnüffelt worden.

3 „Mikroskopisch“ ist für einen Physiker alles, was er mit dem bloßen Auge nicht sehen kann. Das deckt einen Bereich von Bakterien bis hin zu Atomen und Elektronen ab. Es ist ein ziemlich weiter Bereich, doch Physiker sind der Ansicht, es wäre nur verwirrend, wenn es mehr als einen Begriff für sehr kleine Dinge gäbe.

Wenn inmitten der Küche aus dem Nichts ein Leckerbissen für einen Hund erscheinen würde, würde ein Mensch ausflippen, ein Hund aber würde viel lockerer damit umgehen. In der Tat ginge die spontane Erzeugung von Belohnungen für die meisten Hunde vollkommen in Ordnung – sie erwarten ständig ohne ersichtlichen Grund Belohnungen.

Die Quantenmechanik erscheint den Meisten als rätselhaft und beunruhigend, weil sie unseren alltäglichen Erwartungen, wie die Welt funktioniert, widerspricht. Ein Hund ist da ein viel aufnahmebereiterer Zuhörer. Die alltägliche Welt ist ein seltsamer und märchenhafter Ort für einen Hund, und die Vorhersagen der Quantentheorie sind für ihn nicht seltsamer und märchenhafter als, sagen wir einmal, die Funktionsweise eines Türknaufs.⁴

Mit meinem Hund über Quantenmechanik zu sprechen, ist für mich sehr nützlich, weil es mir hilft, mit Menschen über Quantenmechanik zu reden. Die Quantentheorie zu lernen ist ein bisschen wie zu lernen, wie ein Hund zu denken. Wenn man die Welt wie ein Hund als unendliche Quelle von Überraschungen und Wundern sehen kann, dann findet man viel leichter einen Zugang zur Quantenmechanik.

Dieses Buch gibt eine Reihe von Unterhaltungen wieder, die ich mit meinem Hund über Quantenmechanik geführt habe. Jedem Gespräch schließt sich eine genaue Erklärung der betreffenden physikalischen Zusammenhänge an, die für interessierte menschliche Leser geschrieben ist. Die

⁴ Der fraglos den Gesetzmäßigkeiten der klassischen Physik folgt, der aber opponierbare Daumen erfordert, wenn man ihn bedienen will.

Themen umfassen viele Ideen, von denen die meisten vielleicht schon einmal gehört haben, etwa die Welle-Teilchen-Dualität (Kapitel 1) und die Unschärferelation (Kapitel 2), bis hin zu tiefergehenden Konzepten, wie die der virtuellen Teilchen und der QED (Kapitel 9). Bei den Erklärungen geht es sowohl um die verrückten Vorhersagen der Theorie (sowohl praktisch als auch philosophisch) als auch um die Experimente, die diese Vorhersagen belegen. Sie sind nach dem ausgesucht, was für Hunde am interessantesten ist, und illustrieren die Bereiche, die Menschen erstaunlich finden.

„Ich weiß nicht, ich glaube, es braucht noch etwas ... mehr.“

„Mehr was?“

„Mehr von *mir*. Du sagst gar nichts davon, dass ich ein außerordentlich kluger Hund bin.“

„Na gut, also –

„Und außerordentlich niedlich auch.“

„Sicher, aber –“

„Und vergiss nicht: brav. Ich bin viel besser als diese ganzen anderen Hunde.“

„Welche anderen Hunde?“

„Hunde, die nicht ich sind.“

„Sieh mal, das ist eigentlich ein Buch über Physik, kein Buch über dich.“

„Ja, aber es sollte mehr über mich gehen, das ist alles, was ich sagen will.“

„Das wird es nicht, damit musst du leben!“

„Okay, gut. Du brauchst aber meine Hilfe mit dieser ganzen Physik.“

„Wie meinst du das?“

„Manchmal lässt du etwas weg und antwortest nicht auf all meine Fragen. Das solltest du nicht tun.“

„Wann denn? Sag mir doch ein Beispiel!“

„Hmm ... Mir fällt jetzt gerade keines ein. Aber wenn du mir den Text vorliest, dann weise ich dich darauf hin und helfe dir dabei, die Fehler auszubessern.“

„Gut, das scheint sinnvoll zu sein. So werden wir es machen. Wir lesen das ganze Buch noch einmal zusammen durch, und wenn du eine Stelle findest, wo du meinst, ich hätte etwas ausgelassen, reden wir darüber und ich schreibe deine Kommentare dazu ins Buch.“

„Wir reden darüber, so wie wir es gerade tun?“

„Ja, genau so.“

„Und du schreibst das dann so ins Buch?“

„Ja, das werde ich.“

„In diesem Fall sollten wir darüber reden, warum ich der beste Hund bin und der niedrigste, und warum ich mehr Belohnungen bekommen sollte und –“

„Okay, das reicht aber jetzt.“

„Für heute.“