

## Wie Sie dieses Buch lesen sollten

Was hier nun folgt, ist kein Physikbuch. Es ist ein Buch *über* Quantenphysik. Das Wesen der Quantenphysik liegt nicht in der Mathematik. Viel wichtiger sind die Ideen, die ihr zugrunde liegen. Deshalb haben wir unsere Darstellung so weit wie möglich *ent-ziffert*, also von Formeln und Mathematik befreit. Sie müssen nicht alles in diesem Buch verstehen. Verbeissen Sie sich nicht in die Komplexität einzelner Passagen. Die Quantenlogik ist sehr kontraintuitiv, und manchmal ist es unmöglich, sie zu erfassen. Sie ist keine Voraussetzung, um das große Ganze zu begreifen oder die Schönheit der Naturgesetze zu würdigen. Seien Sie versichert, selbst Quantenphysiker verstehen die Quantenphysik nicht ganz. Was sie aber lernen, ist, mit ihr zu arbeiten und zu leben. Lassen Sie sich von den Wellen davontragen. Stellen Sie sich vor, Sie würden Musik hören. Jedes Kapitel entwickelt eine Variation auf das Quantenmotiv. Musik versteht man auch nie ganz, aber man kann sie dennoch genießen.

### Die Struktur des Buches

In diesem Buch geht es um die Quantenphysik und ihr Entstehen zu Beginn des 20. Jahrhunderts; darum, wie sie sich zu der größten Revolution entwickelt hat, die es bei unseren Versuchen, die gesamte Materie auf der Erde und im Weltall zu ergründen, je gegeben hat; darum, wie sehr sie einen Großteil unserer modernen Technologie prägt. Doch wie jeder Bereich der Wissenschaften ist auch die Quantenphysik ein Kapitel in einer Geschichte ohne Ende und ohne wirklichen Anfang. Wie weit muss man in der Geschichte zurückgehen, um den

ersten Ansatz zu dieser Wissenschaft zu finden? Wir haben uns dafür entschieden, mit unserer Darstellung im 16. Jahrhundert zu beginnen, mit Simon Stevin von Brügge, dem Ersten, der wissenschaftliche Dogmen über Bord warf, weil ihn Experimente auf andere, kontraintuitive Wahrheiten verwiesen. Die Quantenphysik ist aus dem Wissen entstanden, das seit Stevin wie ein Staffelstab von Generation zu Generation weitergereicht wurde. Um auf diese Weise Gestalt anzunehmen und sich allmählich in unzähligen alltäglichen Anwendungen unverzichtbar zu machen. Das ist der rote Faden.

**Neben dem Haupttext enthält das Buch zwei weitere markierte Textformen:**

**Bemerkenswertes:** Das sind die eingerückten Passagen. Sie lassen hier und da etwas frischen Wind durch die Lektüre wehen.

**Für Aficionados:** Das sind die gerahmten Passagen. Für jene, die doch ein wenig tiefer schürfen möchten und sich gerne von Zahlen und Formeln verzaubern lassen. Gehen Sie getrost davon aus, dass diese Texte nicht notwendig sind, damit Sie dem Haupttext folgen können.

## 1.1 Wie Aristoteles von seinem Sockel gestoßen wurde



Simon Stevin

Alles begann mit einem scheinbar banalen Experiment zweier Männer, die im 16. Jahrhundert auf den Glockenturm von Delft gestiegen waren. Ihr Fallversuch läutete eine nie da gewesene und alles umwälzende wissenschaftliche Revolution ein. Dabei wurde nicht nur Aristoteles von seinem Sockel gestoßen, sondern auch der jahrtausendealte und unverbrüchliche Glaube erschüttert, dass schwere Gegenstände schneller herabfallen als leichtere.

Die Szene in Delft spielte sich wie folgt ab: Zwei visionäre Köpfe, Simon Stevin van Brügge (1548–1620, Brügger Bürger, Mathematiker, Physiker, Ingenieur *avant la lettre* und meisterhafter Zweifler) und sein Freund Jan Cornets de Groot («der fleißigste Erforscher der Geheimnisse der Natur»\*) machten sich im Jahr 1586 auf den Weg zur Turmspitze der Nieuwe Kerk. Sie waren mit zwei Bleikugeln ausgerüstet,

\* Beschreibung von Simon Stevin. Aus: *Anhang van de weeghconst, inde welcke onder andere weerleydt worden etliche dwalinghe ghedaenten*.

«von denen eine zehnmal größer und schwerer war als die andere». Die Kugeln ließen sie «aus 30 Fuß Höhe» gleichzeitig hinabfallen. Über das, was dann mit ihren Bleikugeln geschah, notierte Stevin, «die leichtere Kugel ist nicht zehnmal länger unterwegs als die schwerere, beide fallen gleichzeitig auf die Erde».

Ihr dritter Mann, der mit beiden Beinen unten auf dem Boden geblieben war und dem man mit dem schlichten Akt des Beobachtens zugleich die wichtigste Aufgabe zugeteilt hatte, stellte mit eigenen Augen und Ohren fest, dass die beiden Bleikugeln tatsächlich gleichzeitig auf einer Holzplanke auftrafen. Eindeutig war nur ein einziger Aufschlag zu hören. Stevin ließ es nicht bei dem Experiment in Delft bewenden, er zog seine Schlüsse daraus. Als er schweißgebadet die Treppe wieder hinabgestürmt war, stand sein Urteil fest: «Das von Aristoteles aufgestellte Prinzip der Proportionalität ist falsch.» Das Experiment ließ keinen Zweifel zu. Seit Aristoteles, also seit fast zweitausend Jahren, waren die Wissenschaftler von einer falschen Annahme ausgegangen. Es war definitiv und für immer bewiesen: Schwere Objekte fallen genauso schnell herab wie leichte.\* Hier beginnt unsere Geschichte. Seit Stevin wurde über einen Zeitraum von gut drei Jahrhunderten der Weg für die Entwicklung der modernen Physik gebnet. Die Vernunft wurde aufgeklärt und der Geist so geformt, dass sie geradewegs auf die Geburt der Quantenphysik zusteuerte.

Stevin, der «da Vinci der Niederlande», nutzte die Gelegenheit, um geschickt auf das Gewicht eines Experiments hinzuweisen: Wie schön, logisch – oder romantisch, wenn man so will – eine Theorie auch erscheinen, und wie sehr sie auch der Intuition entsprechen mag, wenn sie sich nicht bewährt, ist sie wertlos. Damit wurde die Welt der Ideen freundlich ersucht, sich der empirischen Forschung, der Realität, zu stellen. Heute scheint das kaum noch einer Erwähnung wert zu sein,

\* Voraussetzung ist jedoch, dass von bestimmten Details, die vom Wesentlichen ablenken, abstrahiert wird. Die Objekte, die hinabfallen, müssen schwerer sein als Luft, sie dürfen aber auch nicht zu schnell fallen, damit der Luftwiderstand keine zu große Rolle spielt. Mit einem Heliumballon würde es gar nicht funktionieren, der fällt gewissermaßen nach oben. Im luftleeren Raum hingegen fällt ohnehin alles gleich schnell zu Boden.

damals jedoch stellte das einen gewaltigen Bruch mit der Tradition dar. Das erklärt auch, warum es anfangs einen heftigen Widerstand gegen solche aufmüpfigen Standpunkte gab. Man muss allerdings einräumen, dass man solche Versuche erst durchführen konnte, als man über die notwendigen Instrumente dafür verfügte. Die Tatsache, dass die Wissenschaft im 17. Jahrhundert einen rasanten Aufschwung erfuhr, war eine logische Folge von Erfindungen wie dem Teleskop und dem Mikroskop. Je präziser man messen konnte, desto häufiger führten Experimente zu neuen Erkenntnissen und untergruben die früheren Theorien.

Das wird sich wie ein Leitmotiv durch dieses ganze Buch ziehen. Die Fortschritte in der Physik sind ein ständiges Pingpong zwischen Theorie und Experiment, zwischen Denken und Überprüfen. Und letztlich sind es immer die Experimente und nicht der Verstand oder das Bauchgefühl, die entscheiden, ob eine neue Theorie notwendig ist. Ein Wissenschaftler schert sich nicht darum, wer etwas zuerst entdeckt hat. Die Frage, die ihm den Schlaf raubt, lautet: Welches wissenschaftliche Gesetz kann das erklären, was ich mit eigenen Augen sehe? Und kann dieses Gesetz das Ergebnis zukünftiger Experimente vorhersagen? Das ist die Grundlage der wissenschaftlichen Methode und die einzige richtige Weise, Wissenschaft zu betreiben. Letztendlich beruht auch unsere Intuition «üblicherweise» nur auf unserer alltäglichen Erfahrung mit dem relativ Großen, dem Sichtbaren sozusagen, sie ist jedoch unzuverlässig, sobald wir uns in die Welt des mikroskopisch Kleinen begeben. Ein Atom, das, grob gesprochen, aus einem Kern mit ihn umkreisenden Elektronen besteht, ist etwas völlig anderes als eine Miniaturversion einer Sonne mit sie umrundenden Planeten. Was natürlich nicht bedeutet, dass ein gutes Verständnis des Makroskopischen nicht hilfreich sein kann, um mehr Einblick in das Mikroskopische zu gewinnen und umgekehrt.

Wollen wir in die Welt der Quantenphysik eintauchen, müssen wir uns also Stevens radikale Geisteshaltung zu eigen machen. Aus dieser Geisteshaltung heraus haben die Pioniere der Quantenphysik, dreihundertfünfzig Jahre nach Stevin, die gesamte Welt der Physik durcheinandergewirbelt. Da es gewisse Experimente und Mysterien gab, die

sich mit der klassischen Physik beim besten Willen nicht enträteln ließen, entwickelten Werner Heisenberg und Erwin Schrödinger auf eine ganz unvoreingenommene Weise eine neue Theorie, die sehr wohl Antworten bot. Und so führte der rasante Aufschwung, den die Wissenschaft damit nahm, zu einer Menge neuer Fragen, großem Erstaunen, kühnen Hypothesen und schließlich zu den Grundgesetzen der Quantenphysik. Diese Quantenphysik sollte die Menschheit davon überzeugen, dass Teilchen eigentlich auch Wellen sind und sich zudem überall und nirgends gleichzeitig befinden. In Abhängigkeit davon, wie man sie betrachtet und was man misst.

Fernerhin sollte schnell deutlich werden, dass es der Quantenphysik nicht an Paradoxien mangelt. Dafür hat sie uns allerdings auch einiges zu bieten: eine Theorie, die das Verhalten der Materie und aller kleinsten Teilchen erklärt, die uns in die Lage versetzt, die Welt neu – oder besser gesagt: anders – zu entdecken, und die sich für die technologische Revolution des 20. Jahrhunderts als essenziell erweisen sollte.

Niemand anderes als Simon Stevin konnte und durfte am Beginn dieses Buches stehen. Er ist der Urvater der wissenschaftlichen Methode. Und er hielt das Niederländische (und in einem weiteren Sinne: die Umgangssprache) hervorragend dafür geeignet, Wissenschaft zu betreiben. Entsprechend greifen auch wir auf die Umgangssprache zurück, um unser selbst gestecktes Ziel zu erreichen, die Quantenphysik von ihrem geheimnisvollen Charakter zu befreien und einem breiten Publikum zugänglich zu machen. Zu guter Letzt haben wir mit Stevin begonnen, weil der Protagonist des nächsten Kapitels, Galileo Galilei, diesem Sohn Brüggens unverkennbar einiges zu verdanken hat. Ehre, wem Ehre gebührt.

### **Im Dunkeln tappen**

Es war einmal ein Mann, der stockbetrunken im Schein einer Straßenlaterne auf der Suche nach seinen Schlüsseln über die Straße torkelte. Ein Passant, der das bemerkte, half ihm brüderlich bei seiner Suche. Da diese ergebnislos verlief, fragte ihn der Passant, ob er denn sicher sei, dass er seine Schlüssel an dieser Stelle verloren habe. Woraufhin der Betrunkene achselzuckend lallte: «Nein. Aber hier gibt es wenigstens

Licht.»\* Mit anderen Worten: Die Natur mag uns noch so viele Geheimnisse bieten, unsere Aufgabe besteht darin, die Gesetze, die Schlüssel, zu finden, mit denen wir sie alle entziffern können. Dort zu suchen, wo Licht scheint, ist ein völlig logischer Reflex, denn nur dort können wir etwas sehen. Es wird aber immer deutlicher werden, dass wir bei dieser Suche auch im Dunkeln tappen müssen.

## 1.2 Mathematik ist die Sprache der Natur

Es war einmal ein junger Mann, der gern studierte, aber nicht gern zur Kirche ging. Während dieser Galileo Galilei (1564–1642) eines Tages im Dom von Pisa dem äußeren Anschein nach brav Psalmen vor sich hin murmelte, zog eine, mit einer Kette an der Decke befestigte, Lampe, die hin und her schwang, seine Aufmerksamkeit auf sich.\*\* In Erman-gelung eines Chronometers nutzte er seinen Herzschlag, um zu mes-sen, wie lange das Objekt seiner Neugierde brauchte, um von einem äußersten Punkt zum anderen zu schwingen. Mit diesem glänzenden Pendelversuch gelang es Galilei, das kontraintuitive Gesetz zu ent-schlüsseln, das sich hinter einem schwingenden Objekt verbirgt: Wie groß der Ausschlag eines Pendels auch immer sein mag, die Zeit, die für eine Schwingung benötigt wird, bleibt immer gleich.

Galileo Galilei wäre nicht Galileo Galilei gewesen, hätte er sich nicht in hohem Maße von seinem Zeitgenossen inspirieren lassen. Mit sei-nem «Fall-Experiment 2.0» ging der Begründer der modernen Wissen-schaften jedoch noch einen Schritt weiter als Stevin. Er richtete seine wissenschaftliche Aufmerksamkeit auf das Konzept der Zeit und die Zeitintervalle. Das Problem war: Er fand keine Erklärung dafür. Das Einzige, worauf er zurückgreifen konnte, um den Mechanismus hinter etwas so Abstraktem wie der «Zeit» zu erfassen, war die Mathematik. (Notabene: Der niederländische Begriff «wiskunde» für Mathematik

\* Giorgio Parisi, *La chiave, la luce e l'ubriaco*, 2006.

\*\* Heutige Biographen stellen die Authentizität dieser Anekdote infrage, da die be-wusste Lampe möglicherweise erst zwei Jahre später (1585) in der Kathedrale auf-gehängt wurde.