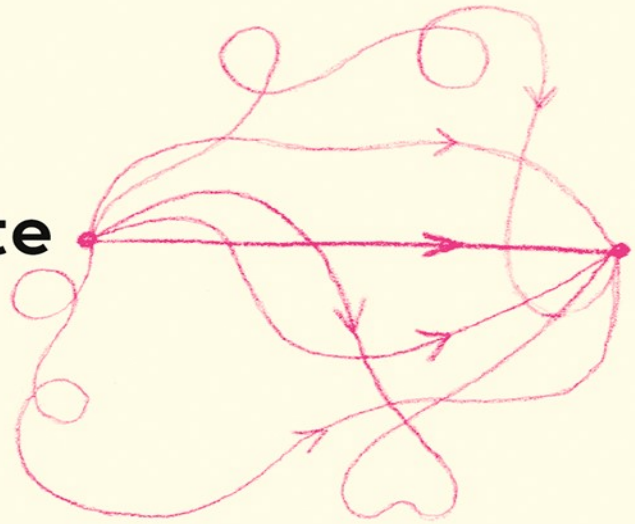
WARUM NIEMAND DIE QUANTENTHEORIE VERSTEHT

Frank Verstraete

Céline Broeckaert

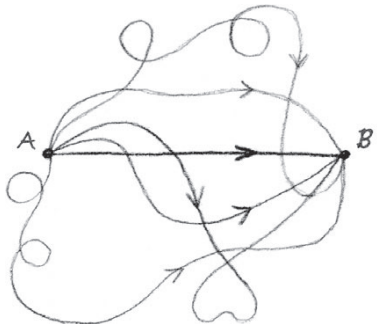


ABER JEDER ETWAS DARÜBER WISSEN SOLLTE

C.H.BECK

Frank Verstraete & Céline Broeckaert

Warum niemand die Quantentheorie versteht



Aber jeder etwas darüber wissen sollte

Aus dem Niederländischen
von Bärbel Jänicke

C.H.Beck

Titel der niederländischen Originalausgabe:
WAAROM NIEMAND KWANTUM BEGRIJPT
EN IEDEREEN ER TOCH IETS OVER MOET WETEN
© 2023, Lannoo Publishers

Die deutsche Ausgabe erscheint mit Unterstützung von
Flanders Literature (www.flandersliterature.be).

Für die deutsche Ausgabe:
© Verlag C.H.Beck GmbH & Co. KG, München 2025
Wilhelmstraße 9, 80801 München, info@beck.de
Alle urheberrechtlichen Nutzungsrechte bleiben vorbehalten.
Der Verlag behält sich auch das Recht vor, Vervielfältigungen
dieses Werks zum Zwecke des Text and Data Mining vorzunehmen.
www.chbeck.de
Umschlaggestaltung: Kunst oder Reklame, München
Umschlagabbildung: © Céline Broeckaert
Satz: Fotosatz Amann, Memmingen
Druck und Bindung: CPI books GmbH, Leck
Printed in Germany
ISBN 978 3 406 83622 0

verantwortungsbewusst produziert
www.chbeck.de/nachhaltig
produktsicherheit.beck.de

Der Atome Räume,
niemand kann sie sehen.
Zu schwach sind unsere Träume,
keine Vision kann sie verstehen.
Quantenphysik war uns einst neu,
heut zeigt sie uns den Weg.
Und mit aller Unsicherheit und Scheu
liefert sie den Beleg:
Der Mensch, der über seine Grenzen schaut,
sieht
nicht nur, was in Stein gemeißelt steht,
sieht, was ihm fremd und unvertraut.

Inhalt

Vorwort des Physikers 11
Vorwort der Autorin 14
Wie Sie dieses Buch lesen sollten 18

I
«Wiskunst» – Mathematik als Kunst des gesicherten Wissens
21

1 Die unwahrscheinliche Effektivität der Mathematik 23
1.1 Wie Aristoteles von seinem Sockel gestoßen wurde 24
1.2 Mathematik ist die Sprache der Natur 28
1.3 Den Löwen erkennt man an seinen Klauen . . . 30
1.4 Algebrakadabra 36

2 Symmetrie 43
2.1 Die Ordnung des Chaos 44
2.2 Wenn die Symmetrie bricht 48
2.3 Gruppen: die Struktur hinter den Symmetrien . . 52
2.4 Trommeln und Atome 58

II
Quantenphysik
65

3 Die (Un-)Wahrscheinlichkeit eines Teilchens **71**

3.1 Den Nagel auf den Kopf getroffen 72

3.2 Licht: Welle und Teilchen 82

3.3 Die ersten Atommodelle 90

3.4 Über Teilchen und Wellenpakete 96

3.5 Das Doppelspaltexperiment 101

3.6 Heisenbergs Mikroskop 104

4 Die erste Quantenrevolution **109**

4.1. Verschönerte Wellen 110

4.2 Informationswellen 115

4.3 Doppelspalt: die Theorie 118

4.4 Quantentunneln 120

4.5 Matrixmechanik 122

4.6 Schönheit ist Wahrheit, Wahrheit ist Schönheit . 125

4.7 Der Spin wird zum Qubit 133

5 Quantenphilosophie **143**

5.1 Quantenquatsch 144

5.2 Verschränkungen 146

5.3 Niels versus Albert 147

5.4 Das EPR-Paradoxon 150

5.5 Schrödinger lässt die Katze aus dem Sack . . . 156

5.6 Hunde, die bellen, beißen nicht 160

5.7 Kontextualität 166

6 Eins, zwei, viele **169**
6.1 Die Ununterscheidbarkeit von Teilchen 171
6.2 Hotel Hilbert 174
6.3 Atome und Moleküle 185
6.4 Die feste Materie 200
6.5 Quantenfarbe 206
6.6 Über Bose, Einstein und Laser 210

7 Pudding und Quark **219**
7.1 Subatomare Physik: die Experimente 220
7.2 Subatomare Physik: die Theorie 239
7.3 Wir sind alle aus Sternen gemacht 257

8 Mehr ist Anders(on) **263**
8.1 Emergenz 264
8.2 Renormierung 273
8.3 Supraleitung 276
8.4 Die Entdeckung der Perfektion 281

9 Die zweite Quantenrevolution **289**
9.1 Quantenmetrologie 291
9.2 Quantensimulation 293
9.3 Quanteninformation 296
9.4 Quantenkomplexität 300
9.5 Quantencomputer 308
9.6 Wenn Quanten spinnen 311
9.7 Quantenphysik 2.0: verschränkte Teilchen . . . 316

Epilog 330
Dank 334
Glossar 336
Ergänzende Literatur 343
Register 346

Vorwort des Physikers

Dieses Buch ist das Ergebnis eines Zusammenpralls der Kulturen. Eines Zusammenpralls der Vorstellungen der Wissenschaft, die die Welt «mathematisiert» und ihr dadurch nach und nach ihre Geheimnisse entlockt, mit der Schönheit und Verwunderung, die uns bei der Entdeckung einer transzendenten Kunst zuteilwerden. Dem Enthüllen symmetrischer Muster in unserer materiellen Welt mit der Einfachheit und Pracht von Schuberts Musik. Der Unvorhersehbarkeit eines Quantensystems mit den widerstreitenden Emotionen von Narziss und Goldmund.

Der Punkt ist: Es gibt überhaupt keinen Zusammenprall. Die Schrödingergleichung gehört ebenso zum Kanon unserer Kultur wie Beethovens 9. Sinfonie. Wenn wir verstehen, wie die Quantenmechanik unserer Welt Farbe verleiht, ist das ebenso erhebend, wie wenn wir die Farbenpracht in Klimts Gemälden genießen. Und wenn wir verstehen, wie Symmetrie ein zentrales Ordnungsprinzip bildet und uns davor bewahrt, zu einer Erbse zusammenzuschrumpfen, ist das ebenso überwältigend, wie wenn wir der Erhabenheit des Grand Canyon gewahr werden. Im Wesentlichen strebt die Physik an, was Michelangelo vorschwebte, als er den Marmorblock begutachtete, aus dem er letztlich den David zum Vorschein brachte: die Natur so zu betrachten und zu beschreiben, dass alles Überflüssige abgeschlagen werden kann und nur die reine Essenz übrig bleibt.

Einen großen Unterschied gibt es jedoch: Obwohl sich die zeitgenössische Kunst und die vor Hunderten oder Tausenden Jahren entstandene Kunst nicht in ihrem Wert unterscheiden und gleich starke Emo-

tionen wecken, bauen sie nicht wirklich aufeinander auf. Die Kunst erfindet sich ständig neu und ist der Originalität verpflichtet (oder auch nicht). Das gilt nicht für die Physik: Hier baut eine Theorie auf der anderen auf. Es ergibt sich eine natürliche Progression: Die Newton'sche Theorie hatte gegenüber der Relativitätstheorie das Nachsehen, und diese wiederum gegenüber der Quantenfeldtheorie; die Quantenwelt des Subatomaren stellte für die großen Geheimnisse der Chemie und aller Materie ebenso wie für die Funktionsweise der Sterne eine wahre Offenbarung dar; die Alchemie entwickelte sich zu einer experimentellen Wissenschaft, die Quecksilber in Gold verwandeln kann. Gerade deshalb ist es so faszinierend, die Geschichte der Quantenphysik zu erzählen: wie einzelne Forscher auf den Ideen anderer aufbauten, um so eine wahre Revolution zu entfesseln, die alle Aspekte unserer Wissenswelt bis in ihre Grundfesten beeinflusst hat. Und dabei deutlich zu machen, wie es uns einige wenige Grundbegriffe der Quantenphysik ermöglichen, unzählige Naturphänomene zu verstehen.

Das Leitprinzip dieses Buches lautet: Die Quantenphysik ist keineswegs unverständlich. Im Gegenteil. Es gibt eine Reihe grundlegender Ideen wie Symmetrie, das Ausschließungsprinzip oder die Unschärferelation, anhand derer jeder mit unserer atomaren Welt Fühlung aufnehmen kann. Mit einer atomaren Welt, die die Grundlage zahlreicher technologischer Anwendungen bildet, die jeder von uns täglich in Anspruch nimmt. Die Komplexität und die kontraintuitiven Eigenschaften der Physik dürfen nicht dazu führen, dass man sie mystifiziert. Das ist genau das Gegenteil dessen, was ein allgemein verständliches Buch leisten sollte. Und von den Lesern darf man auch nicht erwarten, dass sie jeder einzelnen Überlegung folgen können. Das ginge nur in mathematischer Sprache. Die Philosophie dieses Buches lautet daher auch: Die Leser sollten sich auf die Ideen konzentrieren können, denn diese sind intuitiv viel verständlicher und wichtiger als die präzisen logischen Deduktionen. Wir wollen und können die Mathematik der Quantenphysik in einem Buch ohne Formeln gar nicht erklären. Und wir halten dies auch nicht für notwendig. Wir möchten vielmehr erreichen, dass die Leser Neuartiges sehen und fühlen. Und die Welt nach der Lektüre dieses Buches aus einer frischen Quantenperspektive betrachten.

Die Quantenphysik funktioniert, und wir stehen am Vorabend einer zweiten Quantenrevolution, die unsere Technologie tiefgreifend verändern wird. Jeder, der sich für die Funktionsweise und die Schönheit unserer Welt interessiert, sollte zumindest die Grundbegriffe der Quantenphysik kennen. Das ist die Mission dieses Buches.

Vorwort der Autorin

In der Schule konnte mir nie jemand erklären, worin der Sinn von Mathe liegt. «Warum müssen wir das lernen? Damit kann ich später doch ohnehin nichts anfangen.» Immer die gleiche Leier, Sie kennen das sicher. Nach dem Unterricht zog ich frustriert und voller Wut von dannen, um aus dem Poster an der Wand über meinem Bett Trost zu schöpfen: *Do not worry about your difficulties in mathematics, I assure you that mine are greater*. Gezeichnet: Albert Einstein. Wer von uns nicht mit einer göttlichen Mathematikbegabung gesegnet war, guckte sich die Lösungen bei seinem Banknachbarn ab. Und wenn es Richtung Schulferien ging, war alles vergeben – und auch wieder vergessen. Ich selbst sammelte die nötigen Punkte mit Buchbesprechungen, Essays und Referaten; dabei konnte ich wenigstens mein Sprachtalent zur Geltung bringen.

Frustrierend fand ich vor allem, dass ich nicht begriff, *warum* ich keinen Zugang zu dieser Mathematik fand. Heute weiß ich, dass sich Mathematik gar nicht so sehr von der normalen Sprache unterscheidet, sie verwendet lediglich eine andere Ausdrucksform. Mathematik hat ihre eigenen Regeln und ihre eigene Poesie; sie ist ein ideales Übungsfeld für unser Abstraktionsvermögen, für unsere Fähigkeit, die richtigen Fragen zu stellen, problemlösend zu denken (oder denken zu lernen) und Zusammenhänge herzustellen. Auf diese Weise konnte Newton beispielsweise auch mit der gleichen Formel erklären, warum sein Apfel nicht weit vom Stamm fiel und die Planeten in Bahnen um die Sonne kreisen.

Ist es denn wirklich so unverzichtbar zu wissen, wie alles miteinander zusammenhängt? Eigentlich nicht. Ist es von unschätzbarem Wert? Unbedingt. Unser Punkt ist: Quantenphysik ist ebenso wie Literatur,

Musik, Theater, Film und *tutti quanti* ein unbestreitbarer Teil unserer Kultur, denn Kultur ist gleichbedeutend mit Wissen. Sie ist die Übersetzung der Art und Weise, wie wir uns als Menschen entwickeln, wie wir mit unserer Geschichte umgehen, wie wir uns zum unendlich Großen und unendlich Kleinen verhalten, zu allem, was wir tun, und zu allem, worauf wir keinen Einfluss haben. Aus der Kultur entlehnen wir unsere Identität. Und wer an Identität denkt, denkt an Geschichte. Hinter jedem Wendepunkt in der Geschichte steht nicht nur ein starker Mann oder eine starke Frau, sondern auch eine starke Idee. Fast alle dieser Ideen sind aus neuen Erkenntnissen in den Naturwissenschaften hervorgegangen (man denke nur an die Aufklärung, die Industrialisierung, die Automatisierung, die Globalisierung und die Digitalisierung). Insgeheim hoffen wir also, dass sich, vielleicht auch dank dieses Buches, viele junge Menschen nach ihrer Schulzeit für ein naturwissenschaftliches Studium entscheiden. Vor allem auch junge Frauen. Nicht *nur* wegen ihres Geschlechts, aber natürlich *auch* wegen ihres Geschlechts, versteht sich. Denn Mädchen und Frauen sind unglaublich gut in Mathematik und Naturwissenschaften. Dieses Buch liefert dafür den eindeutigen Beweis.

Unwillkürlich muss ich hierbei an meine Abschlussarbeit zur Übersetzung von René Chars *Feuillets d'Hypnos* ins Italienische denken. Ich hatte das Buch zwar schon einmal irgendwo gelesen, aber wie der Übersetzer habe ich anfangs nur wenig davon verstanden. Sein Französisch schien mir vor allem unnötig schwierig. Und doch gingen mir Chars Aphorismen nicht aus dem Kopf. Irgendwie konnte ich mich des Gefühls nicht erwehren, dass er in jedem seiner Texte bis zum Wesentlichen vordrang. Bis ich, nach Monaten der Suche und des unablässigen Bemühens um Verständnis, von einem Aha-Erlebnis ins nächste fiel. Das war es also, was er meinte! Durch ganz banale Alltagsbegebenheiten stellte ich plötzlich Zusammenhänge her, die ich vorher nicht gesehen hatte, und ich entdeckte, was er genau sagen wollte. Nicht alles, aber vieles rückte sich dadurch für mich zurecht. Vieles wurde mir klar. Unbewusst hatte ich mir diese Aphorismen zu eigen gemacht, und nun begann ich mehr und mehr, die Dinge durch

diese Brille zu sehen. Bis ich schließlich zum Kern der Sache vordrang. Und genau das ist es auch, was wir mit diesem Buch zu erreichen hoffen.

Zu behaupten, dass mir seit dem Schreiben dieses Buches im Supermarkt mathematische Formeln durch den Kopf gehen, wenn ich nach einem Becher Quark greife, wäre albern. Aber wenn ich dann mit dem Quarkbecher an der Selbstbedienungskasse stehe, erinnere ich mich doch an das Kapitel über Laser. Wenn ich eine SMS nach Hause schicke, dass ich etwas später komme, entsinne ich mich des Kapitels über Transistoren. Und wenn ich daran denke, dass meine Mutter seit mehr als zwanzig Jahren krebsfrei ist, freue ich mich riesig, dass es MRT-Scanner gibt und ich meine Mutter auf dem Bildschirm meines Computers sehen kann, während wir von Kontinent zu Kontinent zoomen. Alles wird noch bedeutsamer, wenn man weiß, wie es funktioniert. Und ganz gleich, ob wir das nun einem Poeten oder einem Professor für Quantenphysik zu verdanken haben, was zählt, ist der Wert und die Bedeutung, die wir allem, was uns umgibt, zuerkennen. Sie lehrt uns, anders zu denken, und lässt uns wachsen.

Zu guter Letzt noch ein Wort zu meiner Zusammenarbeit mit Frank. Ich dachte, dass ich ganz anders denken würde als der Professor, viel gefühlsmäßiger, jedenfalls nicht in dieser geradlinigen Schwarz-Weiß-Manier, die den Naturwissenschaften und der Mathematik (scheinbar) zu eigen ist. Ich arbeite, lebe und denke vor allem intuitiv. Für mich besteht das Leben aus einer einzigen Abfolge von Überraschungen und Begegnungen, mit viel Raum für Zufall. Während ich dem Professor zuhörte, stellte ich fest, dass wir uns gar nicht so sehr voneinander unterscheiden. Eigentlich sind wir uns in unserem Denken ähnlich und beide von der gleichen Sehnsucht nach Schönheit beseelt. Frank lebt nicht weniger als ich mit einer Leidenschaft für die Dinge, die unser Leben bereichern und spannend machen. Wir sind beide gleichermaßen chaotisch und kreativ, und tun das, was wir tun, aus dem Drang und der Lust heraus, alles, was uns ausmacht und was wir lieben, mit anderen zu teilen. Wir bringen das allerdings auf völlig verschiedene Weise zum Ausdruck. Gerade das macht die Zusammenarbeit so schön, und so notwendig. Sie zwang uns, einander noch bes-

ser zuzuhören, uns noch intensiver (in den anderen) hineinzuversetzen und uns noch stärker um gegenseitiges Verständnis zu bemühen. Ein Gespür füreinander zu entwickeln und einander zu ergänzen, ist wichtig. Gerade indem wir die richtigen Fragen stellen und die richtigen Bezüge herstellen, ergänzen wir uns so gut. Ist der Professor zu dumm, etwas erklären zu können? Bin ich nicht gescheit genug, es zu verstehen? Mag sein! Doch offensichtlich besteht zwischen uns ein Unterschied: Frank denkt und spricht mathematisch, ich denke und spreche niederländisch.

Gleichzeitig ist alles relativ. Es gibt die Mathematik, es gibt die Quantenphysik, es gibt Formeln und Verschränkungen, aber es gibt andere Dinge im Leben, die viel komplizierter sind. In unserem Alltag müssen wir lernen, Konflikte auszutragen und Worte für Gefühle und Gedanken zu finden. In ähnlicher Weise suchen auch wir in diesem Buch nach Worten und wollen die Dinge erfassen. Was wir hier niedergeschrieben haben, sollte nicht nur richtig und verständlich sein, sondern auch schön. Wissen ist vermittelbar, aber es darf durchaus auch inspirierend sein. Ich hoffe, dass Sie diese Botschaft erreicht und vor allem, dass Sie nicht verärgert und frustriert die Flucht ergreifen. Sollte das Thema nach dieser Lektüre doch noch nicht völlig klar geworden sein, dann seien Sie versichert, dass das völlig normal ist. Wir hoffen, dass Ihnen das Lesen zumindest Freude bereitet. Und sollten Sie nicht alles auf Anhieb verstehen: Dann warten Sie einfach, bis sich dieses Aha-Erlebnis einstellt!

Juni 2023, Gent & Cambridge & Nyons
Céline Broeckaert & Frank Verstraete

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

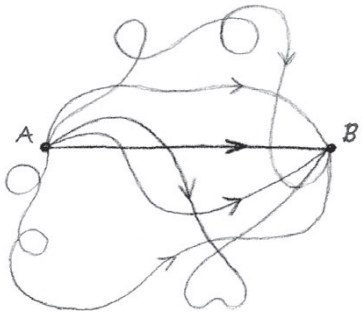
ersten Ansatz zu dieser Wissenschaft zu finden? Wir haben uns dafür entschieden, mit unserer Darstellung im 16. Jahrhundert zu beginnen, mit Simon Stevin von Brügge, dem Ersten, der wissenschaftliche Dogmen über Bord warf, weil ihn Experimente auf andere, kontraintuitive Wahrheiten verwiesen. Die Quantenphysik 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.

Teil 1



«Wiskunst» – Mathematik als Kunst des sicheren Wissens

Kapitel 1

Die unwahrscheinliche Effektivität der Mathematik

Kapitel 1
Kurz gefasst:

+ Eine Theorie steht oder fällt mit Experimenten.
+ Mathematik ist die Sprache der Natur (und ist unwahrscheinlich effektiv).
+ In der Physik geht es um Konzepte und Ideen (nicht um Mathematik).
+ Protagonisten: Simon Stevin, Galileo Galilei, Isaac Newton, William Hamilton

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: Schwerere Objekte fallen genauso schnell herab wie leichtere.* Hier beginnt unsere Geschichte. Seit Stevin wurde über einen Zeitraum von gut drei Jahrhunderten der Weg für die Entwicklung der modernen Physik geebnet. 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 einzig 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 Stevins 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 enträtseln 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 Brügges 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 Ermangelung eines Chronometers nutzte er seinen Herzschlag, um zu messen, 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 entschlüsseln, 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 seinem «Fall-Experiment 2.0» ging der Begründer der modernen Wissenschaften 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 bewusste Lampe möglicherweise erst zwei Jahre später (1585) in der Kathedrale aufgehängt wurde.

ist wie der Begriff «naturkunde» für Physik und «meetkunde» für Geometrie von Simon Stevin eingeführt worden, er leitet sich von «wis const», der «Kunst des Weisen», ab: der Kunst all dessen, was auf Zahlen und gesichertem Wissen beruht.)

In einer sternenklaren Nacht, irgendwo zwischen den Zypressen des idyllischen Pisa, wurde Galilei in seiner Vermutung bestärkt, dass ihm allein die Mathematik weiterhelfen könne. Neben einem schiefen Turm sitzend, blickte er verträumt durch seine ebenso revolutionäre Erfindung, das Teleskop. Was wäre, dachte er plötzlich, wenn ich jetzt eine andere Zivilisation zu Gesicht bekäme? In welcher Sprache sollte ich diese Menschen dann in Gottes Namen ansprechen? Mit Stevins Niederländisch würde das nie und nimmer funktionieren. *E allora …? Matematica!* Und obwohl er damit immer noch nicht die Formel für seine schwingenden Objekte hatte, war die Einsicht, dass die Mathematik der Schlüssel zur Beschreibung der Natur (und zur Kommunikation mit Außerirdischen) war, an sich mindestens ebenso revolutionär. «Das Buch [lies: die Natur] [ist] in der Sprache der Mathematik geschrieben […], und ohne dieses [Wissen] ist es unmöglich, auch nur ein einziges Wort [des Buches] zu verstehen.»

Die Quintessenz davon ist: Die Naturgesetze existieren unabhängig von uns. Nicht der Mensch hat die Mathematik erfunden, um die Natur zu erklären, die Mathematik ist einfach die Sprache der Natur. Experimente zwingen die Wissenschaftler dazu, das Vokabular dieser Sprache hin und wieder zu erweitern. Das erklärt auch, warum der Ausgang eines Experiments objektiv und unveränderlich ist und immer und überall zu demselben Resultat führt. Auf der Erde wie auf dem Mars. Denn ein mathematisches Modell der Welt ermöglicht es uns, Vorhersagen zu treffen und diese Vorhersagen wiederum durch Experimente zu falsifizieren.* Das ist, per Definition, Physik.

Galilei «mathematisierte» die Physik und entkoppelte sie von Philosophie und Religion, womit er sich den Zorn der Kirche und anderer

* In der Physik kann man nicht beweisen, dass eine Theorie richtig ist. Man kann lediglich nachweisen, dass sie falsch ist. Genau das meinen wir mit «falsifizieren». Dass ein Experiment funktioniert, garantiert nicht, dass auch die Theorie richtig ist. Sie kann in diesem einen Fall einfach zufällig zutreffen.

Skeptiker zuzog. Die Quantenphysik wurde Jahrhunderte später zu einer extremen Anwendung dieser Methode. Einzig dank der (sehr) abstrakten Mathematik lässt sich fast alles in der Natur vorhersagen und erklären. Alles auf der Welt wird durch mathematische Funktionen beschrieben. Der Klang, der an unsere Ohren dringt: Funktionen! Das Licht, das auf den Augapfel fällt: Funktionen! Die Flugbahn, die ein Teilchen in der Zeit zurücklegt: Funktionen! Die Wärme, die sich in einem viel zu kleinen Café staut: Funktionen! Die Wahrscheinlichkeit, dass man bei einer Messung eine bestimmte Lösung erhält: Funktionen! Der Einfluss des Flügelschlags eines Schmetterlings im Regenwald des Amazonas auf das Wetter in Gent: Funktionen! Funktionen beschreiben die Welt. Alles existiert in funktionaler Abhängigkeit von etwas anderem. Und das, obwohl wir die Mathematik und ihre Resultate nur in Worten verstehen und erhärten können. Denn letztlich geht es in der Physik um Ideen, nicht um Mathematik. Und hinter jeder starken Idee steht ein Mensch – sagen wir ruhig: ein Riese. Der nächste Riese in unsere Reihe ist Isaac Newton.

1.3 Den Löwen erkennt man an seinen Klauen

Man schrieb das Jahr 1665. Eine Pandemie legte Europa lahm, die Universitäten schlossen ihre Pforten, und Isaac Newton (1642–1727), Anfang zwanzig und Student in Cambridge, begab sich notgedrungen im elterlichen Landhaus Woolsthorpe, etwa hundert Kilometer nördlich der Stadt, in Quarantäne. Während dieser Zeit der Isolation erlebte Newton ein wahres *annus mirabilis*. Nie zuvor hatte jemand in so kurzer Zeit so viele neue Begriffe eingeführt und so viele Erkenntnisse in der Physik gewonnen wie Newton – ein Mann, der nie über London hinausgekommen war, nicht einmal, um das Meer zu sehen (trotz seiner immensen Faszination für Wellen); ein Mann, dem nie die Liebe einer Frau vergönnt war, nicht einmal die seiner Mutter, und vielleicht auch wegen seiner Mutter, die ihn als Dreijährigen bei seiner Großmutter zurückließ, die ihn aufzog. Dem Vernehmen nach hatte Newton selbst auch einen fiesen Charakter, was hier aber eigentlich nichts zur Sache tut.

Isaac Newton

Das größte Problem innerhalb der Physik, über das sich die Wissenschaftler damals den Kopf zerbrachen, war die Methode, mit der die Umlaufbahnen der Planeten beschrieben werden konnten. Oder besser gesagt: die Ermangelung einer Methode zu ihrer Beschreibung. Mit der damaligen Mathematik gelang das überhaupt nicht. *Too bad*, dachte sich Newton, und erfand dann selbst eine neue Mathematik (irgendjemand musste es ja tun): die Infinitesimalrechnung, besser bekannt als Differential- oder Integralrechnung. Wenn man die Position und die Geschwindigkeit von Teilchen und die Kräfte zwischen ihnen kennt, kann man mit der Infinitesimalrechnung herausfinden, wie alles irgendwann ausgesehen hat und irgendwann aussehen wird. Denn letztendlich kann man in der Welt alles aus Bewegung oder Veränderung herleiten. Alles beeinflusst sich gegenseitig, und alles verändert sich in Abhängigkeit von der Zeit: die Zeit, die tickt, das Gras, das wächst, die Planeten, die kreisen, die Elektronen, die rotieren, und die Katzen, die springen. Mit der Infinitesimalrechnung löste Newton das größte Problem der Physik seiner Zeit. Mit ein und derselben Formel gelang es ihm, sowohl die Bahnen der Planeten zu beschreiben als auch zu erklären, warum der sprichwörtliche Apfel nicht weit vom Stamm fällt. Beide Phänomene ließen sich mit exakt denselben Gesetzen erklären. Und das war ziemlich spektakulär, denn vor seiner Zeit war die Wissenschaft von allem, was sich über unseren Köpfen abspielte, eine völlig andere als jene, die sich mit dem Leben auf der Erde

befasste. Selbst die cleveren Pendel- und Fallexperimente von Stevin und Galilei konnten dank der Infinitesimalrechnung (endlich!) in mathematische Begriffe gefasst werden. Und so tat Newton das, was Galilei selbst nicht geschafft hatte: Er verwendete die Mathematik, um das Verhalten von beschleunigten Körpern zu beschreiben.

Newton versus Leibniz

Schon neun Jahre waren seit dem Druck von Newtons *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (im Volksmund «die Principia» genannt) vergangen, als ein Wettbewerb unter den klügsten Wissenschaftlern der Welt ausgeschrieben wurde. Die Männer hinter diesem Versuch, mit dem herausgefunden werden sollte, wer denn nun wirklich der große Rechenmeister war, waren die Mathematiker Johann Bernoulli und Gottfried Wilhelm von Leibniz. Es wurde eine wahre Rätselaufgabe formuliert, die innerhalb von sechs Monaten gelöst werden sollte. Die Frage lautete: Welche Form muss die Bahn einer Kugel annehmen, damit sie möglichst schnell von Punkt A zu einem tiefer gelegenen Punkt B rollt? Als Newton das Rätsel in die Hände bekam, muss sich in ihm eine wahre Sturzflut genialer Eingebungen gelöst haben, denn innerhalb von zwölf Stunden hatte er die Antwort gefunden. Der Argwohn, den er gegenüber Leibniz (seinem großen Rivalen) hegte, bewog Newton allerdings dazu, seine Lösung anonym einzureichen. Vergeblich. Gemäß der Devise «Zeige mir, wie du schreibst, und ich sage dir, wer du bist» wurde das mathematische Genie sofort in seiner Genialität erkannt. Bernoulli hätte es nicht treffender ausdrücken können: *We know the lion by his claw.* Obgleich sich die Rivalität zwischen Leibniz und Newton auf den ersten Blick wie ein banaler Streit darüber ausnahm, «wer der Erste war», war der Gegenstand der Diskussion keineswegs trivial. Schließlich ging es hier darum, wer der Entdecker der Infinitesimalrechnung war, einer der einschneidendsten wissenschaftlichen Entdeckungen überhaupt. Mittlerweile sind sich die Historiker darin einig, dass die Wahrheit irgendwo in der Mitte liegt: Newton und Leibniz haben die Infinitesimalrechnung unabhängig voneinander entdeckt. Newton war aber wohl der Erste.

Besondere Beachtung verdient der Umstand, dass Newtons Naturgesetze und die Infinitesimalrechnung ein deterministisches Universum voraussetzten. Damit folgte der Wissenschaftler dem philosophischen Modell seines Beinahe-Zeitgenossen Descartes. Dieses Modell lässt keinen Zufall zu und lehnt auch jegliche Willkür ab. Für Newton war das Universum so vorhersehbar wie seine Küchenuhr. Nach zwei Uhr folgt halb drei, sechzig Minuten ergeben eine Stunde, und ein Zeitraum von vierundzwanzig Stunden umfasst morgen ebenso wie gestern einen ganzen Tag. Dasselbe galt in seinen Augen auch für das Universum: Wenn man die Position und die Geschwindigkeit aller Teilchen (Sterne, Planeten, Monde, Äpfel …) zu *einem* bestimmten Zeitpunkt kennt, kann man mit Gewissheit und bis auf die Millisekunde genau bestimmen, wo sie sich zu einem x-beliebigen Zeitpunkt befinden werden und wo sie sich in einer dunklen Vergangenheit herumgetrieben haben.

Aus alldem können wir ohne Scheu oder Übertreibung schließen, dass Newton das Fundament der gesamten klassischen Physik gelegt hat. Leider wird sich irgendwann herausstellen, dass Newtons klassische Physik zur Beschreibung der allerkleinsten Teilchen nicht ausreicht. In diesem Bereich werden die Gesetze der Quantenphysik zum Tragen kommen. Die klassische Physik versagt zudem bei der Beschreibung des Allergrößten und all dessen, was sich der Lichtgeschwindigkeit annähert; dort wird Einstein mit seiner Relativitätstheorie eingreifen. Auch Newtons deterministisches Weltbild wird einen ordentlichen Knacks abbekommen. Denn in der Quantenphysik spielt der Zufall eine bedeutende Rolle. Hier existiert alles aufgrund von Zufall und Wahrscheinlichkeit. Paradoxerweise nutzte die Quantenphysik Newtons Infinitesimalrechnung dazu, seine eigenen Theorien zu untergraben. Und erstaunlicherweise war dazu keine neue Mathematik erforderlich. Die Formeln der Infinitesimalrechnung wurden einfach grundlegend anders interpretiert, nämlich in Form von Wellenfunktionen und Wahrscheinlichkeiten, zwei Begriffen, die sich, wie die nächsten Kapitel zeigen werden, wie ein roter Faden durch diese Geschichte ziehen werden.

Was die Quantenphysik eindeutig noch mit der Infinitesimalrech-

nung gemeinsam hat, ist, dass auch sie von einer «unwahrscheinlichen Effektivität» o der « unheimlichen N ützlichkeit» z eugt. U rsprünglich erfunden, um zu beschreiben, wie Elektronen um einen Atomkern kreisen, entpuppt sie sich am Ende als viel breiter anwendbar als erwartet. Eugene Wigner (1902–1995) hat sich über diese «unvernünftige Wirksamkeit» der Mathematik in den Naturwissenschaften auf sehr schöne Weise verwundert: «Man kann sich des Eindrucks kaum erwehren, dass uns hier ein Wunder gegenübersteht, das in seiner überraschenden Natur durchaus mit dem Wunder vergleichbar ist, dass der menschliche Geist tausend Argumente aneinanderreihen kann, ohne in Widersprüche zu geraten, oder mit den beiden Wundern der Existenz von Gesetzen der Natur und der Fähigkeit des menschlichen Geistes, sie erahnen.»

Simon Stevin hatte mit dem Niederländischen auf die Sprache gesetzt, um Wissenschaft zu betreiben. Galilei tauschte die Umgangssprache gegen die Mathematik ein. Mit Newtons Infinitesimalrechnung erreichte die Mathematik schließlich einen absoluten Höhepunkt.

Newton war, kurz gesagt, der erste echte Wissenschaftler. Oder anders formuliert: Er war der letzte der Zauberer. Vor seiner Zeit war jeder nach eigenem Gutdünken vorgegangen, man hatte alles Mögliche kombiniert und mit viel Geduld und Spekulieren für alles (nicht wirklich für *alles*) eine Erklärung gefunden. Plötzlich waren es dann doch die Planeten, die um die Sonne kreisten und nicht umgekehrt. Aber niemand konnte erklären, *warum* das so war. Das Warum kam nicht über den Status bloßer Vermutungen hinaus. Galilei und Stevin hatten zwar die «wissenschaftliche Methode» eingeführt, doch Newton kam das Verdienst zu, ihr eine klare Ausgestaltung zu geben. Das erforderte natürlich neue Erkenntnisse, einen neuen Ansatz und einen neuen Werkzeugkasten. Und es blieb eine Aufgabe für viele Generationen nach ihm. Der Astronom und Mathematiker Sir Hamilton – unser nächster Riese – war mehr als bereit dazu, diese Herausforderung anzunehmen.