Nobelpreisträger für Physik
Frank Wilczek

Fundamentals

Die zehn Prinzipien der modernen Physik

C.H.Beck

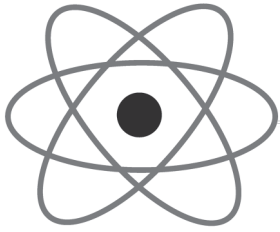
Frank Wilczek

FUNDAMENTALS

Frank Wilczek

FUNDAMENTALS

Die zehn Prinzipien der modernen Physik



Aus dem Englischen von Jens Hagestedt

C.H.Beck

Titel der englischen Originalausgabe:
«Fundamentals. Ten Keys to Reality»
Copyright © 2021 by Frank Wilczek
Zuerst erschienen 2021 bei Penguin Press,
New York

Für die deutsche Ausgabe:
© Verlag C.H.Beck oHG, München 2021
Umschlagentwurf: Rothfos & Gabler, Hamburg
Umschlagabbildung: Fraktal © Shutterstock/Pavel Pustina
Satz: Janß GmbH, Pfungstadt
ISBN Buch 978 3 406 77551 2
ISBN eBook (epub) 978 3 406 77552 9
ISBN eBook (PDF) 978 3 406 77553 6

Die gedruckte Ausgabe dieses Titels erhalten Sie im Buchhandel sowie versandkostenfrei auf unserer Website
www.chbeck.de.
Dort finden Sie auch unser gesamtes Programm und viele weitere Informationen.

Für Betsy

OFFENBARUNGEN
Organisierte Mannigfaltigkeiten spinnen
Die strukturierten Muster, die unser Leben bestimmen.
Geburt, Lernen, Liebe und leidiges Alter –
Gaben, die wir nicht erworben haben, Grenzen, die wir nicht billigen.
Das Weltall, groß über unser Begreifen, wächst in aller Stille weiter.
Himmelskörper, dünn gesät,
Strahlen aus nach idealen Gesetzen.
Sie sprechen nicht die Sprache, die an Wiegen gesungen wird.
Zeit ist Wandel, unparteiisch durchgesetzt.
Ihre ehrfurchtgebietende Weite sehen wir an Dingen, die alt sind,
Ihre Geschäftigkeit bezeugen winzige, vollkommene Uhren.
Die Zeit war lange vor uns da und wird uns lange überdauern.
Wenn ich meine Welt in meiner Vorstellung erneure,
Bist das Geliebte, mir Nächste immer du.

INHALT

Vorwort: Wiedergeboren 9

Einleitung 17

I. WAS ES GIBT 25
1. Es gibt viel Raum 27
2. Es gibt viel Zeit 53
3. Es gibt nur wenige Bausteine 72
4. Es gibt nur wenige Gesetze 101
5. Es gibt viel Materie und Energie 132

II. ANFÄNGE UND ENDEN 147
6. Die Geschichte des Kosmos ist ein offenes Buch 149
7. Komplexität entsteht 163
8. Es gibt noch viel mehr zu sehen 171
9. Rätsel bleiben 188
10. Komplementarität erweitert den Horizont . . 206

Nachwort: Der lange Weg nach Hause 222

Danksagung 227

ANHANG 229

Anmerkungen 241

Register 249

VORWORT: WIEDERGEBOREN

I

Dieses Buch handelt von den fundamentalen Erkenntnissen, die wir beim Studium der Natur gewinnen können. Ich habe viele Menschen kennengelernt, die unbedingt wissen wollen, was die moderne Physik darüber sagt. Es sind Juristen, Ärzte, Künstler, Studenten, Lehrer, Eltern oder einfach wissbegierige Leute. Sie sind intelligent, haben aber kaum einschlägige Kenntnisse. Ich habe im Folgenden versucht, die zentralen Botschaften der modernen Physik so einfach wie möglich darzustellen, ohne es an Genauigkeit fehlen zu lassen. Meine neugierigen Freunde und ihre Fragen habe ich beim Schreiben des Buches ständig im Hinterkopf gehabt.

Für mich umfassen jene fundamentalen Erkenntnisse weit mehr als bloße Fakten, die die Prozesse der Natur betreffen. Gewiss, diese Fakten sind eindrucksvoll und auf eine merkwürdige Weise schön. Aber die Denkweise, die es uns ermöglichte, sie zu entdecken, war ebenfalls eine große Entdeckung. Und es ist wichtig, darüber nachzudenken, was diese fundamentalen Erkenntnisse darüber aussagen, wie wir Menschen Teil des großen Ganzen sind.

II

Ich habe zehn Leitsätze formuliert, die ich als meine fundamentalen Erkenntnisse darstellen werde. Jeder wird Gegenstand eines Kapitels

sein. Im Hauptteil jedes Kapitels werde ich dessen Thema aus verschiedenen Perspektiven beleuchten und anschließend faktenbasierte Vermutungen über die künftige Entwicklung äußern. Diese faktenbasierten Vermutungen auszuarbeiten hat Spaß gemacht, und ich hoffe, sie sind spannend zu lesen. Sie sollen eine weitere zentrale Botschaft vermitteln: dass unser Verständnis der Natur, vergleichbar einem Lebewesen, immer noch wächst und sich verändert.

Ich habe darauf geachtet, Fakten und Spekulationen zu trennen und für die Fakten die Art der Beobachtungen und Experimente anzugeben, die sie als Fakten ausweisen – lautet doch die vielleicht wichtigste Botschaft des Buches, dass wir viele Aspekte der Natur sehr gut verstehen. Albert Einstein zufolge «ist die Welt unserer Sinneserfahrungen begreifbar»: «Die Tatsache, dass sie begreifbar ist, bleibt ein Wunder.»[1] Auch das war eine hart erkämpfte Entdeckung.

Gerade weil sie ein solches Wunder ist, darf die Begreifbarkeit des Universums nicht vorausgesetzt werden. Wir müssen sie beweisen. Der überzeugendste Beweis ist, dass selbst unser unvollständiges Verständnis es uns ermöglicht hat, Großartiges und Erstaunliches zu erreichen.

In meinen Forschungen versuche ich, Lücken in unserem Verständnis zu füllen und Experimente zu entwerfen, mit denen sich die Grenzen des Möglichen weiter hinausschieben lassen. Es war mir eine Freude, beim Schreiben dieses Buches einen Schritt zurückzutreten und staunend über einige besonders bedeutsame Errungenschaften nachzudenken, die über Zeit und Raum hinweg zusammenarbeitende Generationen von Wissenschaftlern und Ingenieuren bereits erreicht haben.

III

Dieses Buch über fundamentale Erkenntnisse der Wissenschaft soll auch eine Alternative zum traditionellen religiösen Fundamentalismus bieten. Es greift einige Grundfragen der Religion auf, behandelt sie aber, indem es statt Texten oder Traditionen die physikalische Wirklichkeit zurate zieht.

Viele meiner wissenschaftlichen Helden: Galileo Galilei, Johannes Kepler, Isaac Newton, Michael Faraday, James Clerk Maxwell, waren – repräsentativ für ihre Zeit und ihre Umgebung – gläubige Christen. Sie dachten, sie könnten Gott nahekommen und ihn ehren, indem sie Sein Werk studieren. Einstein war zwar nicht religiös im herkömmlichen Sinne, hatte aber eine ähnliche Einstellung. Er bezog sich oft auf Gott (oder «den Alten»). Eines seiner berühmtesten Zitate ist dafür ein Beispiel: «Raffiniert ist der Herrgott, doch boshaft ist er nicht.»[2]

Der Geist, der diese Wissenschaftler in ihren Bestrebungen leitete, orientierte sich nicht an Dogmen, ob religiöser oder antireligiöser Art. Ich formuliere ihre Haltung, die auch die meine in diesem Buch ist, gern so: Wenn wir untersuchen, wie die Welt «funktioniert», untersuchen wir, wie Gott «funktioniert», *und erfahren dadurch, was Gott ist*. In diesem Geist können wir das Streben nach Erkenntnis als eine Form des Gottesdienstes und unsere Entdeckungen als Offenbarungen interpretieren.

IV

Das Schreiben dieses Buches hat meine Wahrnehmung der Welt verändert. Es begann als Darstellung und verwandelte sich in eine Meditation. Beim Nachdenken ergaben sich unerwartet zwei übergreifende Themen, deren Klarheit und Tiefe mich in Erstaunen versetzten.

Das erste dieser Themen ist Überfluss. Die Welt ist groß. Ein Blick in den klaren Nachthimmel genügt, um zu erkennen, dass es «da draußen» jede Menge Raum gibt. Wenn wir diese Menge nach sorgfältiger Untersuchung beziffern, sind wir sprachlos. Aber die Größe des Weltraums ist nur ein Aspekt des Überflusses der Natur – und für die menschliche Erfahrung nicht einmal der wichtigste.

Denn auch «unten ist viel Platz», wie Richard Feynman gesagt hat:[3] Jeder menschliche Körper enthält weit mehr Atome, als es Sterne im sichtbaren Universum gibt, und die Zahl der Neuronen in unserem Gehirn entspricht etwa der der Sterne in der Milchstraße. Das Universum in uns ist eine würdige Ergänzung zum Universum außerhalb von uns.

Für die Zeit gilt Analoges wie für den Raum: Kosmische Zeit hat es im Überfluss gegeben und wird es im Überfluss geben. Die seit dem Urknall vergangene Zeit ist unendlich viel länger als die Dauer eines Menschenlebens. Doch enthält ein Menschenleben, wie ich darlegen werde, weit mehr Bewusstseinsmomente, als es in der gesamten bisherigen Geschichte des Universums menschliche Leben gegeben hat. Wir besitzen einen Überfluss an innerer Zeit.

Die Natur besitzt auch einen Überfluss an bisher unerschlossenen Reichtümern für Schöpfung und Wahrnehmung. Die Wissenschaft enthüllt, dass die Welt in unserer Nähe weit mehr Energie und verwertbares Material in bekannten und zugänglichen Formen enthält, als wir uns gegenwärtig zunutze machen. Diese Erkenntnis erweitert unsere Möglichkeiten und sollte unseren Ehrgeiz beflügeln.

Unsere ungestützte Wahrnehmung zeigt uns nur einige wenige Splitter jener Wirklichkeit, die die wissenschaftliche Forschung offenbart. Denken Sie etwa an das Sehen: Unser Gesichtssinn ist unser weitestes und wichtigstes Portal zur Außenwelt. Doch er lässt so vieles ungesehen! Teleskope und Mikroskope erschließen riesige, in Licht kodierte Informationsschätze, die gewöhnlich unerkannt bleiben. Hinzu kommt, dass unser Sehvermögen auf eine Oktave – die Spanne des sichtbaren Lichts – einer unendlich breiten Klaviatur elektromagnetischer Strahlung beschränkt ist, die von Radiowellen über Mikrowellen bis zum Infrarot auf der einen Seite und von Ultraviolett bis zu Röntgen- und Gammastrahlen auf der anderen Seite reicht. Und selbst innerhalb unserer einen Oktave ist unser Farbensehen verschwommen. Doch während unsere Sinne viele Aspekte der Wirklichkeit nicht wahrnehmen können, erlaubt uns unser Verstand, unsere natürlichen Grenzen zu überschreiten. Die Pforten unserer Wahrnehmung zu erweitern ist und bleibt ein großes Abenteuer.

V

Das zweite Thema ist, dass man «wiedergeboren» sein muss, um das physikalische Universum schätzen zu können.

Als ich den Text dieses Buches ausarbeitete, wurde mein Enkel Luke geboren, und ich durfte die ersten Monate seines Lebens beobachten. Ich sah, wie er mit großen Augen seine Hände betrachtete und wie ihm klar wurde, dass er sich ihrer bedienen konnte. Ich sah, mit welcher Freude er lernte, nach Gegenständen in der Außenwelt zu greifen und sie zu ergreifen. Ich sah ihm zu, wie er mit Gegenständen experimentierte: wie er sie fallen ließ und nach ihnen suchte, und wie er dies wieder und wieder tat, als wäre er nicht ganz sicher, ob er sie finden würde, um dann aber vor Freude zu lachen, wenn er sie fand.

Auf diese und vielerlei andere Weise konstruierte Luke ein Modell der Welt. Er näherte sich ihr mit unersättlicher Neugier und wenigen Vorurteilen. Durch Interagieren mit ihr lernte er, was für fast alle erwachsenen Menschen selbstverständlich ist, zum Beispiel dass sich die Welt in ein Selbst und ein Nicht-Selbst spaltet, dass Gedanken die Bewegungen des Selbst, nicht aber die des Nicht-Selbst zu steuern vermögen und dass wir Dinge betrachten können, ohne ihre Eigenschaften zu verändern.

Babys sind gleichsam kleine Wissenschaftler, die Experimente machen und daraus Schlüsse ziehen. Doch nach den Maßstäben der modernen Wissenschaft sind die Experimente, die sie machen, ziemlich primitiv. Babys arbeiten ohne Teleskope, Mikroskope, Spektroskope, Magnetometer, Teilchenbeschleuniger, Atomuhren und andere Instrumente, mit denen wir unsere zutreffendsten und genauesten Modelle der Welt konstruieren. Auch beschränkt sich ihre Erfahrung auf einen kleinen Temperaturbereich; sie sind umgeben von einer Atmosphäre mit einer ganz bestimmten chemischen Zusammensetzung und einem ganz bestimmten Druck; die Schwerkraft der Erde zieht sie (und alles in ihrer Umgebung) nach unten, während die Erdoberfläche sie trägt – und so weiter.

Babys machen sich ein Bild von der Welt, das nur das berücksichtigt, was sie *innerhalb der Grenzen ihrer Wahrnehmung und ihrer Umwelt* erfahren. Für praktische Zwecke ist das auch das richtige Vor-

gehen. Um in der Alltagswelt zurechtzukommen, ist es effizient und vernünftig, von der Alltagswelt zu lernen.

Die physikalische Welt, die die moderne Wissenschaft offenbart, unterscheidet sich allerdings sehr von dem Modell, das Babys konstruieren. Öffnen wir uns, neugierig und vorurteilslos, der Welt erneut – erlauben wir uns, wiedergeboren zu werden –, sehen wir die Welt mit anderen Augen.

Einige Dinge müssen wir lernen. Die Welt ist aus wenigen Grundbausteinen aufgebaut, die strengen, aber seltsamen und ungewohnten Gesetzen folgen.

Einige Dinge müssen wir verlernen.

Die Quantenmechanik hat offenbart, dass man nicht beobachten kann, ohne das Beobachtete zu verändern. Jeder Mensch erhält Botschaften aus der Außenwelt, die niemand sonst erhält. Stellen Sie sich vor, Sie und ein Freund sitzen in einem sehr dunklen Raum und starren auf ein schwaches Licht. Dimmen Sie es immer weiter herunter, zum Beispiel indem Sie es mit immer mehr Stoffschichten bedecken. Irgendwann werden Sie und Ihr Freund nur noch einzelne Blitze sehen. Sie werden diese Blitze aber zu unterschiedlichen Zeitpunkten sehen, da das Licht in einzelne Quanten zerfallen ist und Lichtquanten nicht geteilt werden können. Auf dieser fundamentalen Ebene leben wir in verschiedenen Welten.

Die Psychophysik hat offenbart, dass die meisten Handlungen nicht vom Bewusstsein, sondern von unbewussten Einheiten gesteuert werden und dass das Bewusstsein nur Berichte über die Handlungen verarbeitet, die von diesen unbewussten Einheiten stammen. Mithilfe einer Technik, die als transkranielle Magnetstimulation (TMS) bezeichnet wird, ist es möglich, gezielt die motorischen Zentren entweder der linken oder der rechten Hirnhälfte einer Testperson zu stimulieren. Ein genau gezieltes TMS-Signal an das rechte motorische Zentrum verursacht zum Beispiel ein Zucken des linken Handgelenks, ein genau gezieltes TMS-Signal an das linke motorische Zentrum ein Zucken des rechten Handgelenks. Alvaro Pascual-Leone hat von dieser

Technik in einem einfachen Experiment, aus dem sich weitreichende Schlussfolgerungen ergaben, auf ingeniöse Weise Gebrauch gemacht. Er bat die Testpersonen, auf ein Stichwort hin zu entscheiden, ob sie mit dem rechten oder dem linken Handgelenk zucken wollten. Anschließend bat er sie, ihre Absicht nach Erhalt eines weiteren Stichworts auszuführen. Die Testpersonen befanden sich in einem Gehirnscanner, so dass der Experimentator ihre motorischen Bereiche bei der Vorbereitung der Zuckung beobachten konnte. Hatten sie sich entschieden, mit dem rechten Handgelenk zu zucken, war ihre linke motorische Zone aktiv; hatten sie sich entschieden, mit dem linken Handgelenk zu zucken, war ihre rechte motorische Zone aktiv. So war es noch vor dem Zucken möglich vorauszusagen, welche Wahl getroffen worden war.

Jetzt kommt eine aufschlussreiche Wendung: Pascual-Leone machte manchmal von einem TMS-Signal Gebrauch, um der Entscheidung der Testperson zu widersprechen (und sie, wie sich herausstellte, zu «überschreiben»). Das Zucken der Testperson war dann dasjenige, das das TMS-Signal ihr auferlegt hatte, nicht das, für das sie sich entschieden hatte. Bemerkenswert ist nun, wie die Testpersonen das Geschehene erklärten: Sie berichteten nicht, dass eine externe Kraft von ihnen Besitz ergriffen habe, sondern sie sagten: «Ich habe es mir anders überlegt.»

Eine eingehende Untersuchung zeigt, dass unser Körper, hier: unser Gehirn – der physische Unterbau unseres «Selbst» –, entgegen aller intuitiven Vermutung aus dem gleichen Material aufgebaut ist wie das «Nicht-Selbst» und mit diesem zusammenzuhängen scheint.

In unserer Eile, die Dinge zu verstehen, lernen wir als Kleinkinder, die Welt und uns selbst misszuverstehen. Auf dem Weg zu einem tiefen Verständnis gibt es viel zu verlernen und viel zu lernen.

VI

Wiedergeburt im Sinne der Wissenschaft kann verwirrend sein – aber auch aufregend wie eine Achterbahnfahrt. Und sie belohnt mit einem

Geschenk: Den in diesem Sinne Wiedergeborenen erscheint die Welt frisch, klar und wunderbar reich. Sie beginnen, William Blakes Vision zu leben:

> Die Welt zu sehn in einem Korn aus Sand
> Den Himmel in einem Blumenbunde
> Unendlichkeit halt' in der Hand
> Und Ewigkeit in einer Stunde.[4]

EINLEITUNG

I

Das Universum ist ein seltsamer Ort.

Neugeborenen bietet die Welt ein Durcheinander verwirrender Eindrücke. Ein Baby lernt jedoch schnell, zwischen Botschaften zu unterscheiden, die aus einer inneren, und solchen, die aus einer äußeren Welt stammen. Die Innenwelt enthält Gefühle wie Hunger, Schmerz, Wohlbefinden und Schläfrigkeit sowie die Unterwelt der Träume. Außerdem gehören ihr Gedanken an, wie jene, die den Blick, das Greifen und bald auch das Sprechen lenken.

Die Außenwelt ist eine komplizierte, vom Verstand hervorgebrachte Konstruktion. Unser Baby verbringt viel Zeit damit, sie zu erschaffen. Es lernt, in seiner Wahrnehmung unveränderliche Muster zu erkennen, die im Unterschied zu seinem Körper nicht auf seine Gedanken reagieren, es organisiert diese Muster zu Objekten und lernt auch, dass sich diese Objekte einigermaßen vorhersehbar verhalten.

Schließlich erkennt unser vormaliges Baby, das jetzt ein Kind ist, einige Objekte als ihm ähnliche Wesen, mit denen es kommunizieren kann. Nachdem es mit diesen Wesen Informationen ausgetauscht hat, kommt es zu der Überzeugung, dass auch sie eine Innen- und eine Außenwelt besitzen, dass bemerkenswerterweise alle zusammen viele Objekte gemeinsam haben und dass diese Objekte denselben Gesetzen gehorchen.

II

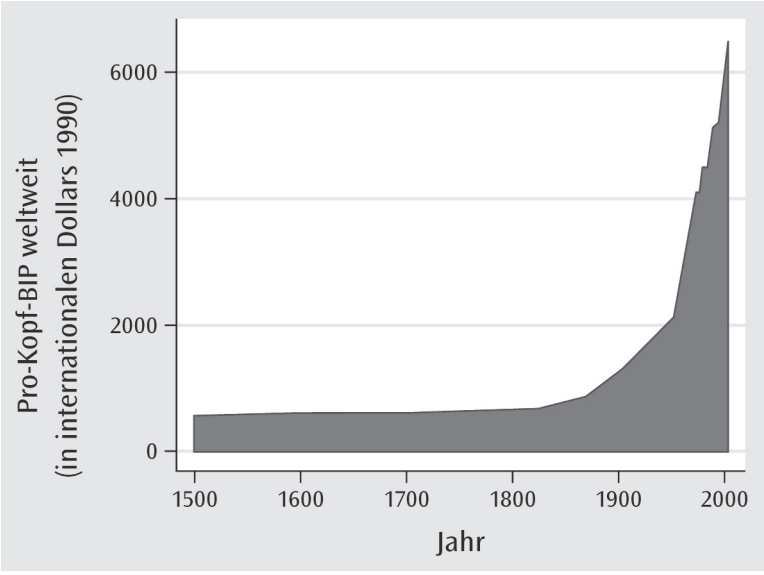
Zu verstehen, wie die gemeinsame Außenwelt – also die Natur – beherrscht werden kann, ist ein für das Leben entscheidendes praktisches Problem mit vielen Aspekten. Um später als erwachsener Mensch beispielsweise in einer Jäger-und-Sammler-Gesellschaft zu überleben, müsste unser Kind lernen, wo es Wasser gibt, welche Pflanzen und Tiere essbar sind und wie man sie findet bzw. die Letzteren jagt, wie man Essen zubereitet und kocht und vieles andere mehr.

In komplexeren Gesellschaften muss anderes erlernt werden: wie man Spezialwerkzeuge herstellt, für dauerhafte Strukturen sorgt und die Zeit im Auge behält. Erfolgreiche Lösungen für die Probleme, mit denen uns die Natur konfrontiert, werden entdeckt, weitergegeben und über Generationen hinweg gesammelt. Sie werden für jede Gesellschaft zu deren «Technologie».

Nichtwissenschaftliche Gesellschaften entwickeln oft reichhaltige und komplexe Technologien. Einige dieser Technologien haben es Menschen ermöglicht – und ermöglichen es ihnen noch heute –, in schwierigen Umgebungen wie der Arktis oder der Kalahari-Wüste zu leben. Andere haben den Bau großer Städte und beeindruckender Monumente, wie der ägyptischen und der mittelamerikanischen Pyramiden, möglich gemacht.

Doch fast die gesamte Menschheitsgeschichte über, nämlich bis zur Entstehung der wissenschaftlichen Methode, wurden Technologien aufs Geratewohl entwickelt, das heißt, erfolgreiche Techniken wurden mehr oder weniger zufällig entdeckt. Sobald man über sie gestolpert war, wurden sie in Form von spezifischen Verfahren, Ritualen und Traditionen weitergegeben. Sie bildeten weder ein logisches System, noch gab es systematische Bemühungen, sie zu verbessern.

Technologien, die auf «Faustregeln» basierten, ermöglichten es den Menschen, zu überleben, sich fortzupflanzen und oft auch, ein gewisses Maß an Muße zu genießen und ein befriedigendes Leben zu führen. Bis vor wenigen Jahrhunderten war das für alle Menschen in allen Kul-



turen genug. Sie konnten nicht wissen, was ihnen fehlte und dass das, was ihnen fehlte, für sie wichtig sein könnte.

Wir wissen heute, dass ihnen vieles fehlte. Das obige Diagramm, das die Entwicklung der menschlichen Produktivität im Laufe der letzten fünfhundert Jahre zeigt, spricht für sich selbst, und es spricht Bände.

III

Der moderne Ansatz zur Erforschung der Welt entstand im 17. Jahrhundert in Europa, nachdem es zuvor, zum Teil auch anderswo, partielle Vorwegnahmen gegeben hatte. Die Konstellation von Durchbrüchen der Erkenntnis, die als «wissenschaftliche Revolution» bezeichnet wird, erbrachte inspirierende Beispiele dafür, was durch kreative Auseinandersetzung des menschlichen Geistes mit der Natur erreicht werden konnte. Die Methoden und Grundhaltungen, die zu diesen Durchbrüchen geführt hatten, wurden zu Vorbildern für die künftige Forschung. Dieser Impetus stand am Beginn der Wissenschaft, wie wir sie kennen. Sie hat immer nach vorn geblickt.

Das 17. Jahrhundert brachte an vielen Fronten, unter anderem im Schiffbau und bei der Konstruktion von Maschinen, optischen Instrumenten (darunter vor allem Mikroskopen und Teleskopen), Uhren und Kalendern, dramatische theoretische und technologische Fortschritte. Als unmittelbare Folge davon hatten die Menschen mehr Macht über die Natur, sie konnten mehr Dinge sehen und ihre Angelegenheiten zuverlässiger regeln. Was die sogenannte wissenschaftliche Revolution einzigartig machte und ihr zu Recht diesen Namen eintrug, ist jedoch weniger greifbar. Es war eine Umwälzung in der Einstellung: Ein neuer Ehrgeiz, eine neue Zuversicht war das Ergebnis.

Die von Kepler, Galilei und Newton entwickelte Methode verbindet die demütige Disziplin, die Fakten zu respektieren und von der Natur zu lernen, mit der offensiven Chuzpe, das, was man gelernt zu haben glaubt, systematisch möglichst überall anzuwenden – auch in Situationen, auf die sich die ursprünglichen Beweise nicht beziehen. Wenn es funktioniert, hat man etwas Nützliches entdeckt; wenn es nicht funktioniert, hat man etwas Wichtiges gelernt. Ich bezeichne diese Einstellung als radikalen Konservativismus; sie ist für mich das wesentlich Neue an der wissenschaftlichen Revolution.

Der radikale Konservativismus ist konservativ, weil er uns auffordert, von der Natur zu lernen und Fakten zu respektieren – zwei wichtige Aspekte dessen, was als wissenschaftliche Methode bezeichnet wird. Der radikale Konservativismus ist radikal, weil er das, was man gelernt hat, so weit wie möglich nutzbar macht. Für das Vorgehen der Wissenschaft ist dieser Zug nicht weniger wichtig: Sie verdankt ihm den Schneid.

IV

Die neue Einstellung war vor allem von Entwicklungen auf einem Gebiet inspiriert, das im 17. Jahrhundert schon auf eine lange Geschichte zurückblicken konnte und weit fortgeschritten war: Gemeint ist die Himmelsmechanik, die Beschreibung der Bewegungen der Objekte am Himmel.

Die Menschen haben Regelmäßigkeiten wie den Wechsel von Tag und Nacht, den Zyklus der Jahreszeiten, die Phasen des Mondes und den geordneten Lauf der Gestirne natürlich schon lange vor dem Beginn der Geschichte im engeren Sinne erkannt. Mit dem Aufkommen der Landwirtschaft wurde es wichtig, die Jahreszeiten im Auge zu behalten, um zu den günstigsten Zeiten zu pflanzen und zu ernten. Eine weitere starke, wenn auch irrige Motivation für genaue Beobachtungen war die Astrologie: der Glaube, dass das menschliche Leben in unmittelbarem Zusammenhang mit kosmischen Rhythmen stehe. Die Menschen studierten den Himmel sorgfältig und aus den verschiedensten Gründen – auch aus schlichter Neugier.

Es stellte sich heraus, dass sich die große Mehrheit der Sterne auf recht einfache, vorhersehbare Weise bewegt, wobei wir ihre *scheinbare* Bewegung heute als Effekt der Drehung der Erde um ihre Achse interpretieren (die sogenannten Fixsterne sind so weit entfernt, dass relativ kleine Veränderungen ihrer Entfernung, sei es infolge ihrer Eigenbewegung oder infolge des Laufs der Erde um die Sonne, für das bloße Auge unsichtbar sind). Einige wenige außergewöhnliche Objekte – die Sonne, der Mond und einige «Wanderer», darunter die mit bloßem Auge erkennbaren Planeten Merkur, Venus, Mars, Jupiter und Saturn – folgen diesem Muster jedoch nicht.

Die Astronomen der Antike hatten die Positionen dieser besonderen Objekte über viele Generationen hinweg aufgezeichnet und schließlich gelernt, ihre Veränderungen mit einiger Genauigkeit vorauszusagen. Erforderlich dafür waren geometrische und trigonometrische Berechnungen nach komplizierten, aber genau umrissenen Methoden. Ptolemäus (ca. 100–170) fasste diese Erkenntnisse in einem mathematischen Text, dem sogenannten *Almagest*, zusammen. (*Magest* ist eine arabische Lehnbildung nach dem griechischen Superlativ *mégistos*, «der größte». Das Wort hat die gleiche Wurzel wie das Wort «majestätisch». *Al* ist der arabische Artikel «der».)

Ptolemäus' Synthese war eine großartige Leistung, hatte aber zwei Defizite. Das eine war ihre Komplexität und ihr damit verbundener

Mangel an Eleganz. Vor allem erbrachten die Methoden zur Berechnung der Planetenbahnen viele Werte, die auf Anpassung der Berechnungen an Beobachtungen zurückzuführen waren. Kopernikus (1473–1543) bemerkte, dass einige dieser Werte auf erstaunlich einfache Weise miteinander zusammenhingen und dass diese scheinbar «zufälligen» Zusammenhänge geometrisch erklärbar waren, wenn man annahm, dass die Erde, die Venus, der Mars, der Jupiter und der Saturn sich um die Sonne als Zentrum drehen (und dass sich der Mond um die Erde dreht).

Das zweite Defizit von Ptolemäus' Synthese ist schlicht und einfach, dass sie nicht genau genug ist. Tycho Brahe (1546–1601) konstruierte in Vorwegnahme der heutigen «Großforschung» aufwendige Instrumente und gab viel Geld für den Bau eines Observatoriums aus, das viel genauere Beobachtungen der Planetenpositionen ermöglichte. Und die neuen Beobachtungen ergaben unverkennbar Abweichungen von den Voraussagen des Ptolemäus.

Johannes Kepler (1571–1630) entwickelte ein geometrisches Modell der Planetenbahnen, das sowohl einfach als auch genau war. Er berücksichtigte Kopernikus' Ideen und nahm weitere wichtige Änderungen an Ptolemäus' Modell vor. Vor allem trug er der Tatsache Rechnung, dass die Umlaufbahnen der Planeten um die Sonne keine Kreise, sondern Ellipsen sind, in deren einem Brennpunkt die Sonne steht. Er erkannte auch, dass die Geschwindigkeit, mit der die Planeten ihre Bahnen ziehen, von ihrer Entfernung von der Sonne abhängt – je kleiner diese Entfernung, umso höher die Geschwindigkeit –, ihr Radiusvektor aber in gleichen Zeiten gleiche Flächen überstreicht. Nach diesen Änderungen war das System nicht nur wesentlich einfacher, sondern es wurde der Wirklichkeit auch besser gerecht.

Derweil studierte Galileo Galilei (1564–1642) sorgfältig einfache Bewegungsformen auf der Erde, etwa die Art und Weise, wie Kugeln schiefe Ebenen hinabrollen und wie Pendel schwingen. Diese bescheidenen Untersuchungen, die Positionen und Zeitspannen Zahlen zuordneten, mögen für die Behandlung großer, das Funktionieren der Welt

betreffender Fragen kläglich ungeeignet erscheinen, und sicher wurden sie von den meisten akademischen Zeitgenossen Galileis, die sich mit erhabenen Fragen der Philosophie befassten, als trivial empfunden. Aber Galilei ging es um eine andere Art des Verstehens: Er wollte *etwas* genau verstehen, statt *alles* nur vage. Er suchte nach mathematischen Formeln, die seine bescheidenen Beobachtungen vollständig beschrieben, und er fand sie.

Isaac Newton (1643–1727) verknüpfte Keplers Geometrie der Planetenbahnen mit Galileis Beschreibung von Bewegungen auf der Erde. Er bewies, dass die beiden Theorien Sonderfälle allgemeiner Gesetze beschreiben, die überall und jederzeit für alle Körper gelten. Newtons Theorie, die wir heute als klassische Mechanik bezeichnen, eilte von Triumph zu Triumph, da sie erlaubte, die Bahnen von Kometen vorauszusagen, den Gezeiten auf der Erde gerecht wurde und neue technische Errungenschaften ermöglichte.

Newtons Arbeit war ein überzeugendes Beispiel dafür, dass man Fragen von großer Tragweite beantworten kann, indem man von einem präzisen Verständnis einfacher Fälle ausgeht. Newton bezeichnete diese Methode, die der Archetyp des wissenschaftlichen radikalen Konservativismus ist, als *Analyse und Synthese*. Er hat über sie gesagt:

> Wie in der Mathematik, so sollte auch in der Naturforschung bei Erforschung schwieriger Dinge die analytische Methode der synthetischen vorausgehen. Diese Analysis besteht darin, dass man aus Experimenten und Beobachtungen durch Induktion allgemeine Schlüsse zieht […]. Auf diese Weise können wir in der Analysis vom Zusammengesetzten zum Einfachen, von den Bewegungen zu den sie erzeugenden Kräften fortschreiten, überhaupt von den Wirkungen zu ihren Ursachen, von den besonderen Ursachen zu den allgemeineren, bis der Beweis mit der allgemeinsten Ursache endigt. Dies ist die Methode der Analysis; die Synthesis dagegen besteht darin, dass die entdeckten Ursachen als Prinzipien genommen werden, von denen ausgehend die Erscheinungen erklärt und die Erklärungen bewiesen werden.[1]

V

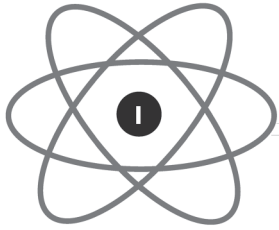
Bevor ich Newton verlasse, möchte ich ihn ein zweites Mal zitieren, um seine Verwandtschaft mit seinen Vorgängern Galilei und Kepler und mit allen, die in ihre Fußstapfen treten, zu belegen:

> Die gesamte Natur zu erklären ist zu schwierig, als dass ein einzelner Mensch, ja eine einzelne Epoche dies leisten könnte. Es ist viel besser, weniges genau zu machen & den Rest anderen zu überlassen, die nach einem kommen.[2]

Ein Zitat von John R. Pierce, einem Pionier der modernen Informationswissenschaft, macht sehr schön deutlich, was das moderne Konzept wissenschaftlichen Verstehens allen anderen Ansätzen voraushat:

> Wir verlangen, dass unsere Theorien mit dem sehr breiten Spektrum von Phänomenen, die sie zu erklären versuchen, im Detail harmonieren. Und wir bestehen darauf, dass sie uns nützliche Orientierung, keine Rationalisierungen liefern.[3]

Pierce wusste sehr genau, dass für diesen höheren Standard ein schmerzlicher Preis zu zahlen ist: der Verlust der Unschuld. «Wir werden die Natur nie wieder so gut verstehen, wie die griechischen Philosophen sie verstanden haben, denn [...] wir wissen zu viel.»[4] Meiner Meinung nach ist dieser Preis nicht zu hoch. Und auch wenn man es anders sieht: Es gibt kein Zurück.



WAS ES GIBT