

## 2 Naturgesetze und Theorien

Eine der größten und vielleicht erstaunlichsten Entdeckungen der Physik ist die Tatsache, dass sich das gesamte Universum gemäß relativ einfacher Prinzipien verhält. Diese Prinzipien lassen sich zudem noch leicht durch mathematische Formeln ausdrücken. Weil die Natur diese allgemeinen Regeln anscheinend wie Gesetze strikt befolgt, werden sie in der Physik als Naturgesetze bezeichnet.

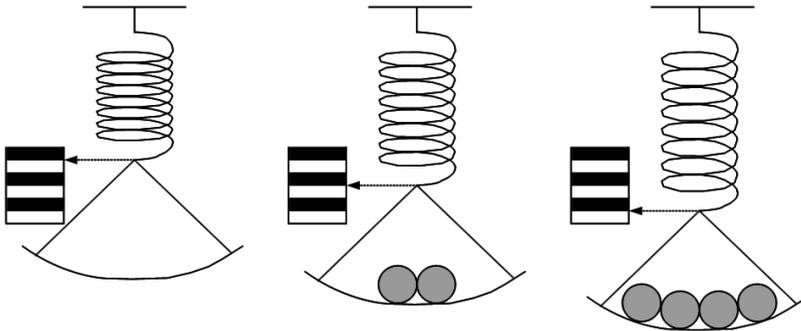
Noch während meines Studiums vor mehr als 20 Jahren wurde uns diese Gegebenheit meist mit den Worten geheimnisvoll und rätselhaft nahegebracht. Warum sollte sich gewöhnliche Materie nach mathematischen Regeln richten? Könnte sich das Universum nicht auch ganz anders verhalten? Und woher kennt die Natur denn die Mathematik und die physikalischen Formeln?

Heute dagegen besitzen wir eine recht gute Vorstellung davon, warum dies so sein muss. Bestärkt durch Grundlagenexperimente der letzten drei Jahrzehnte hat man neue Vorstellungen von dem entwickelt, was die Bestandteile von Materie letztendlich ausmacht. Die fundamentalsten Bausteine unserer Welt, die Elementarteilchen, lassen sich unter dem Gesichtspunkt des Informationsbegriffs viel besser verstehen als zuvor. Damit liegen sie wesentlich näher an der abstrakten Mathematik als an der bisherigen Auffassung von Materie, die von unseren Alltagserfahrungen geprägt ist. Wenn aber diese neuartige Denkweise korrekt ist, so kann sich ein Elementarteilchen kaum anders als mathematisch korrekt verhalten. Es ist sozusagen fleischgewordene Mathematik.

Doch immer der Reihe nach. Bevor wir uns diesem zentralen Punkt ausführlich zuwenden können, müssen wir erst einmal einige Hausaufgaben erledigen. Woraus besteht unsere Materie? Was ist ein elementares Teilchen? Und vor allem: Was ist ein Naturgesetz?

Ein *Naturgesetz* oder physikalisches Gesetz wird aus einer Reihe von Beobachtungen abgeleitet. Diese Beobachtungen müssen unter kontrollierten Bedingungen vorgenommen werden, damit sie wiederholbar und nachprüfbar sind. Nur so können sich andere Forscher von der Richtigkeit der Resultate überzeugen und beispielsweise die Versuchsanordnung nachbauen und verfeinern.

Die Kunst beim Entdecken von Gesetzmäßigkeiten liegt darin, in einem Experiment einerseits die richtigen Fragen an die Natur zu stellen und andererseits aus den Messdaten die korrekten Folgerungen zu ziehen. Nicht nur der Aufbau und die saubere Durchführung der Versuche, sondern auch die Auswertung der gewonnenen



- 1 Eine Feder wird um so mehr gedehnt, je stärker sie belastet wird. Ihre Dehnung ist proportional zur Belastung.

nen Daten ist entscheidend für den Erfolg eines Experiments. Hierbei kommt es darauf an, geeignete Regelmäßigkeiten zu finden, die dann üblicherweise zur Abkürzung des Sachverhalts mit einer mathematischen Gleichung ausgedrückt werden.

Machen wir als Beispiel einen ganz einfachen Versuch und fragen uns, wie stark sich eine Feder unter einer Belastung dehnt. Wir könnten mit verschiedener Kraftanstrengung selbst an der Feder ziehen und jeweils die Änderung ihrer Länge bestimmen, doch leider ist unser Zug an der Feder eine rein subjektive Angelegenheit und damit unbrauchbar. Wir entschließen uns daher, die Feder mit dem Gewicht von annähernd gleichen Gegenständen zu belasten und dabei jeweils ihre Ausdehnung zu messen. Dazu befestigen wir die Feder an der Decke und hängen mit Bindfäden eine Schale daran. Nun legen wir in die Schale etwa gleich große Äpfel hinein und bestimmen, wie stark sich die Feder jeweils dehnt. Dabei stellen wir fest, dass die Dehnung bei jedem weiteren Apfel um denselben Betrag anwächst. Eine doppelte oder dreifache Menge von Äpfeln bewirkt also eine doppelte oder dreifache Änderung der Federlänge. Wir haben damit eine einfache Gesetzmäßigkeit gefunden: Die Dehnung einer Feder steigt im selben Verhältnis an wie ihre Belastung. Die Ausdehnung ist demnach *proportional* zur Belastung.

Nun gilt es, diese Beobachtung noch in eine griffige Formel zu überführen. Die Belastung der Feder entsteht durch das Gewicht der Äpfel, genauer gesagt, durch deren Gewichtskraft. Dabei verlassen wir uns im Moment auf unseren gesunden Menschenverstand und klären erst in einem nachfolgenden Kapitel, was eine Kraft überhaupt ist. Doch die Feder könnte nicht nur durch die Gewichtskraft von Äpfeln gedehnt werden, sondern auch dadurch, dass wir mit einer gleich großen Kraft an ihr ziehen. Es kommt also nur auf die Stärke der Kraft an und nicht darauf, wie sie ausgeübt wird. Damit sind wir so weit und können eine Gleichung für das Dehnungsverhalten einer Feder aufstellen:

$$\text{Kraft} = \text{Federkonstante} \cdot \text{Dehnung}$$

Dieses Federgesetz besteht wie fast alle physikalischen Gesetze aus einem allgemeinen Teil, der die Abhängigkeit zwischen der Dehnung und der Größe der Kraft angibt und einem speziellen Teil, der von der verwendeten Feder abhängt. Dieser spezielle Anteil, die Federkonstante, muss für jede Art von Feder erst gemessen werden. Wir können ihre Größe nicht im Voraus aus anderen Überlegungen ableiten, sondern nur im Nachhinein feststellen. Sobald wir dies aber durchgeführt haben, können wir unsere nun geeichte Federwaage zum Wiegen verwenden. Die Federkonstante ist also zunächst eine unbekannte Größe in unserer Gleichung, ein sogenannter *freier Parameter*.

Die obige Gleichung ist demnach nichts anderes als eine Kurzschreibweise für alle unsere Beobachtungen, und meistens werden die darin enthaltenen Begriffe noch durch Buchstaben abgekürzt:

$$F = D \cdot x$$

Eine solche Formel hat nicht nur den Vorteil, dass sie kurz und prägnant ist, sondern man kann mit ihr auch rechnen und muss nicht mehr alle Messungen selbst durchführen. Beispielsweise können wir nun ausrechnen, wie stark die Feder gedehnt wäre, wenn wir viereinhalb Äpfel in die Schale legen würden. Die Voraussetzung dafür aber ist, dass wir durch unsere Messungen genügend Vertrauen in unsere Gleichung entwickelt haben, sodass wir der Rechnung auch glauben können. Dieses Vertrauen wird am höchsten in dem Bereich sein, in dem wir unsere Beobachtungen gemacht haben. Es wird um so geringer werden, je weiter wir über diesen Bereich hinausgehen. Vielleicht glauben wir noch einer Rechnung für 10 Äpfel, aber kaum einer für 100 Äpfel, denn wir wissen, dass dies die Feder nicht mehr verkraften wird. Weil eine Feder eben nicht beliebig stabil ist, verliert diese Gleichung irgendwann ihre Gültigkeit. Hier versagt nicht die Mathematik, sondern ihre Anwendung auf unseren Versuch.

Mit Naturgesetzen verbinden wir vor allem Objektivität und Verlässlichkeit. Wir mussten weder voraussetzen, wer die Messungen mit der Feder durchführt, noch wann oder wo dies stattfindet. Alles andere würde unserer Erfahrung auch völlig zuwiderlaufen. Ohne diese Verlässlichkeit könnten wir uns in unserer Umwelt nämlich gar nicht zurechtfinden, denn sie ist das Fundament, auf dem wir durchs Leben gehen. Trotzdem habe ich im letzten Abschnitt mit Absicht die Begriffe Vertrauen und Glaube verwendet. Entfernen wir uns nämlich bei den Berechnungen zunehmend von den Messungen, so verlieren wir den sicheren Hafen unserer Beobachtungen. Wir müssen diesen Verlust durch das Vertrauen ersetzen, das wir den Gleichungen entgegen bringen. Obwohl wir in diesen Regionen keinen direkten Beweis

für ihre Gültigkeit haben, glauben wir trotzdem an sie. In letzter Zeit haben meines Erachtens allerdings einige Physiker den Bogen in dieser Richtung ziemlich überspannt. Doch davon mehr zu gegebener Zeit.

Eine andere Form des Vertrauens bringen wir den Naturgesetzen ständig entgegen. Wir können nämlich nicht beweisen, ob eine Gesetzmäßigkeit morgen noch dieselbe ist wie heute. Wir sehen nur tagtäglich, dass es sich so verhält, und vertrauen darauf, dass dies auch weiterhin der Fall sein wird. Tatsächlich sind die grundlegenden Gesetze der Physik nach unseren Erkenntnissen absolut unveränderlich. Sie bestimmen ohne Ausnahme das Geschehen im gesamten Universum, von Anfang an bis jetzt. Ihre Gleichungen sind meist von bestechender Einfachheit, was allerdings noch lange nicht heißt, dass sie sich leicht auf eine gegebene Situation anwenden lassen. Oft sind die Berechnungen so komplex, dass sie sich nur mit Zusatzannahmen und damit nur näherungsweise durchführen lassen.

Ein Naturgesetz allein, wie beispielsweise das Federgesetz, liefert noch kein umfassendes Bild unseres Universums. Dies leistet erst eine physikalische *Theorie*. Sie versucht, alle gefundenen Gesetzmäßigkeiten zu sammeln und weiter zu verallgemeinern oder sie aus noch grundlegenderen Prinzipien abzuleiten. Theorien bilden heute die eigentliche Basis der Physik. Idealerweise werden sie von vielen experimentellen Tatsachen gestützt und mit allgemeinen physikalischen Überlegungen untermauert. Sie bilden die Wirklichkeit in einem mathematischen Modell ab, das möglichst viele Naturphänomene auf eine einheitliche Weise beschreibt.

Eine neue Theorie gilt immer dann als erfolgreich, wenn sie auf der einen Seite die bestehenden Resultate von Experimenten besser erklären kann als ihre Vorgänger und andererseits neue Vorhersagen macht, die wiederum überprüft werden können. Was eine bessere Erklärung ausmacht, ist aber gar nicht so eindeutig zu beantworten. Die neue Theorie könnte mehr Phänomene erklären als die alte, oder sie könnte dies mit weniger Annahmen bewerkstelligen. Ebenso muss die neue Theorie die alte mit einschließen und aufzeigen, warum jene nur eine beschränkte Gültigkeit hat. Allerdings gilt eine Theorie gilt so lange als Spekulation, bis sich ihre Prognosen auch bewahrheitet haben. Dies scheidert heutzutage aber leider viel zu oft an den verfügbaren technischen Mitteln.

Knifflig wird es immer dann, wenn verschiedene Modelle der Wirklichkeit im Rahmen der Messgenauigkeit dasselbe vorhersagen. Welchem Modell soll man nun glauben? Eine andere Gefahr ist oftmals eine fast erschreckende Flexibilität, die gewisse Theorien an den Tag legen. Ihre Gleichungen enthalten meist zahlreiche freie Parameter, also Größen, die man nicht oder nur sehr ungenau kennt. Weicht dann ein Experiment deutlich von den Vorhersagen einer solchen Theorie ab, so ist es oft sehr leicht die Parameter derart anzupassen, dass die Theorie im Rahmen der Messfehler immer noch zutreffend ist. Lassen sich Theorie und Experiment am Ende

aber gar nicht unter einen Hut bringen, so kann man immer noch einige Grundannahmen und damit die Struktur der Gleichungen verändern. Aber ist dies dann noch dieselbe Theorie?

Vielleicht klingt dies für Sie überraschend negativ, doch hat sich die Physik in einigen Bereichen verhältnismäßig weit von einem wohl dosierten Wechselspiel zwischen Theorie und Experiment entfernt. Manche neuere Theorien liefern kaum handfeste Vorhersagen und bei anderen liegen die Möglichkeiten zu ihrer Testbarkeit für uns so weit weg wie die Mondrückseite für einen Steinzeitmenschen. Wie soll man die Korrektheit einer solchen Theorie abschätzen? Oder mit welchen Argumenten soll man sie widerlegen?

Trotzdem liegt der Schlüssel zu neuen erfolgreichen Theorien fast immer in Beobachtungen, die nicht im Einklang mit den Vorhersagen der bisherigen Theorien stehen. Man könnte nun meinen, dass solch eine neue Erklärungsmöglichkeit in der Regel freudig begrüßt wird. Doch meist ist das Gegenteil der Fall, und es beginnt ein regelrechter Abwehrkampf. Die etablierten Forscher wehren sich, weil sie sich gezwungen sehen, von ihrem lieb gewonnenen und vertrauten Gedankengebäude Abschied zu nehmen. Wie leicht einem solch ein Übergang fällt, hängt stark vom Naturell der betreffenden Person ab. Manchmal ist dies auch eine Generationsfrage.

Einige Naturauffassungen früherer Zeiten erscheinen uns heute ziemlich naiv. So glaubte man noch im 18. Jahrhundert an die Phlogistontheorie. Mit ihr beschrieb man damals einen Verbrennungsvorgang. Phlogiston war nach dieser Theorie ein fester Bestandteil aller brennbaren Stoffe und wurde bei einer Verbrennung einfach freigesetzt. Diese Vorstellung war aus damaliger Sicht jedoch gar nicht so abwegig, denn man hatte noch keine Kenntnis von chemischen Reaktionen und der damit verbundenen Wärmeentwicklung. Sobald sich aber dieses neuartige Wissen durchsetzte, löste sich das Phlogiston buchstäblich in Nichts auf und ward nie mehr gesehen.

Ein anderes Beispiel ist das ptolemäische Weltbild mit einer ruhenden Erde im Zentrum. Um die Bewegungen der Planeten und der Sonne auch nur annähernd beschreiben zu können, mussten in umständlicher Art und Weise vielfach ineinander geschachtelte Kreisbahnen konstruiert werden. Schuld an diesem für uns heute merkwürdigem Weltbild waren religiös motivierten Vorstellungen, die keinerlei wissenschaftlichen Fortschritt duldeten. Die Erde war von Gott als Mittelpunkt der Welt auserkoren. Und für die Umlaufbahnen der Planeten kamen lediglich Kreisbahnen infrage, weil nur sie dem göttlichen Ideal der Vollkommenheit am nächsten standen. Erst im 17. Jahrhundert sorgten präzise Beobachtungsdaten für eine radikale Korrektur dieses Bildes und stellten die Sonne in den Mittelpunkt der Welt, zumindest vorübergehend.

Anhand eines dritten Beispiels sehen wir, warum es ganze Jahrhunderte dauern kann, bis man endlich in der Lage ist, das Offensichtliche nicht nur zu erkennen, sondern auch zu rechtfertigen. Jede Weltkarte zeigt uns eine frappierende Ähnlichkeit der Küstenlinie des westlichen Afrikas und des östlichen Südamerikas. Dies war auch schon im 17. Jahrhundert bekannt. Im 18. Jahrhundert gab es dann die ersten Vermutungen über das Auseinanderbrechen eines großen Urkontinents und ein anschließendes Auseinanderdriften der Kontinente. Doch erst im Jahr 1915 schlug Alfred Wegener (1880–1930) seine Theorie der Kontinentalverschiebung vor, konnte deren Anerkennung aber nicht mehr erleben. Ein erster Nachweis der mittlerweile etablierten Plattentektonik gelang schließlich in den 1960er Jahren durch Altersmessungen an Tiefseegesteinen. Aber gerade einmal seit den 1990er Jahren sind wir in der Lage mittels Satellitenpeilungen die Wanderungsgeschwindigkeiten der Kontinente, direkt zu bestimmen. Sie bewegen sich in etwa so schnell, wie unsere Fingernägel wachsen, also ein paar Zentimeter pro Jahr.

Neben der technologischen Entwicklung, die für die Bestätigung der Kontinentaldrift nötig war, ist noch ein anderer Faktor für den langen Zeitraum von der ersten nebulösen Vermutung bis zum Übergang ins Standardschulwissen verantwortlich. In den früheren Jahrhunderten war in den Köpfen der Forscher einfach nicht genug Zeit für einen solchen Naturvorgang vorhanden. In Europa galt die Zeitrechnung der Bibel und die Welt war weniger als 10 000 Jahre alt. Höchstens die Sintflut könnte Anlass zu einem katastrophalen Auseinanderbrechen von Kontinenten gegeben haben. Zeiträume mit Hunderten von Millionen Jahren, die für heutige Geologen selbstverständlich sind, standen für die damaligen Vorstellungen einfach nicht zur Verfügung. Auch der innere Aufbau der Erde, die ja scheinbar fest und unbeweglich ist, war noch unbekannt. Somit konnte selbst Wegener keine korrekte Erklärung für seine These liefern. Heute wissen wir, dass die Kontinente auf einem zähflüssigen Erdmantel schwimmen und dass ihre Bewegungen Vulkanismus und Erdbeben hervorrufen. Doch vor 300 Jahren war das alles schlichtweg unvorstellbar.

Wenn wir also auf unsere Wissenschaftsgeschichte zurückblicken, finden wir immer wieder Weltbilder, die sich später als nicht haltbar erwiesen haben. Und da dies zu allen Zeiten der Fall war, bin ich der festen Überzeugung, dass wir auch heute mindestens eine grundlegende Modellvorstellung besitzen, die in Zukunft zurückgenommen werden muss. Wir sollten deshalb nicht zu sehr über die früheren Weltbilder und Theorien schmunzeln, sondern uns stattdessen an die eigene Nase fassen. Auch wir sind mit ziemlicher Sicherheit gerade auf irgendeinem Holzweg unterwegs, aber welcher ist das? Da wir dies nur vermuten können, sollten wir zumindest bei unbewiesenen wissenschaftlichen Behauptungen entsprechend vorsichtig sein. Über welche unserer heutigen Theorie wird man in hundert Jahren nur noch lächeln?