

4 Mechanik und Schwerkraft

Wenn wir verstehen wollen, wie unser Universum aufgebaut ist, müssen wir uns einerseits seine Bestandteile genauer ansehen und andererseits die Kräfte betrachten, die zwischen ihnen wirken. Wir müssen die Welt also in Teilbereiche zerlegen und schauen, wie diese Teilbereiche miteinander wechselwirken.

Das Zerlegen hat in der Physik eine lange Tradition und hat zu vielen Entdeckungen geführt. Es setzt allerdings unausgesprochen voraus, dass es auch Sinn macht gewisse Bestandteile als getrennt voneinander anzusehen. In unserer Alltagswelt ist dies normalerweise hinreichend gegeben. Die Äpfel in einer Schale liegen zwar eng beisammen, können aber sehr wohl als voneinander getrennte Objekte betrachtet werden. Nehmen wir einen Apfel aus der Schale und legen ihn auf den Tisch, so ist es immer noch der gleiche Apfel, der sich nun aber an einem anderen Ort befindet.

Ohne irgendwelche Kräfte zwischen den Bestandteilen der Welt würde buchstäblich nichts passieren. Kein Objekt würde die Anwesenheit eines anderen spüren und wäre folglich vollkommen isoliert. Auch in diesem Bereich ist es den Physikern gelungen, Ordnung in die umfangreichen Beobachtungen zu bringen. Übrig geblieben sind dabei lediglich vier Kräfte. Ich werde sie Ihnen in der Reihenfolge ihrer Entdeckung vorstellen und Ihnen gleichzeitig einen Überblick über unser gesamtes Universum geben. Dieser Weg führt uns auch zu den physikalischen Theorien und den damit verbundenen Weltbildern.

Die erste umfassende und mathematisch präzise Abbildung für physikalische Vorgänge stammt von Isaac Newton (1643–1727). In einem monumentalen Werk veröffentlichte er im Jahre 1687 die Bewegungsgesetze der Mechanik und das Gravitationsgesetz zur Erklärung der Schwerkraft. Er hat damit den Grundstein zur theoretischen Physik gelegt, die eine mathematische Beschreibung der Welt anstrebt. Wegen dieser Verdienste wird die Mechanik auch oft als newtonsche Mechanik bezeichnet. In diesem Modell werden alle ausgedehnten Dinge durch mathematische Punkte idealisiert, die als Körper bezeichnet werden. Alle Körper, von den Äpfeln bis zu den Planeten, sind denselben *drei newtonschen Gesetzen* unterworfen:

- Solange keine Kraft auf einen Körper wirkt, verbleibt er in seiner Bewegung. Wenn er sich nicht bewegt, so bleibt er in Ruhe, und falls er sich bewegt, dann setzt er diese Bewegung gleichförmig fort.

- Jede Kraft wirkt in eine bestimmte Richtung und verursacht eine Geschwindigkeitsänderung eines Körpers in dieser Richtung. Bei gleicher Kraft ist diese Änderung um so größer, je kleiner die Masse des Körpers ist.
- Kräfte treten immer paarweise auf. Übt ein Körper auf einen anderen eine Kraft aus, so erfährt der andere Körper stets eine Gegenkraft in umgekehrter Richtung.

Das erste Gesetz geht auf Galileo Galilei (1564–1642) zurück, der mit seinen zahlreichen Versuchen als Begründer der Experimentalphysik gilt. Für die damalige Zeit war es aber alles andere als offensichtlich, dass ein Körper nicht von alleine zur Ruhe kommt. Denn dies ist genau das, was wir im Alltag ständig beobachten. Galilei fiel aber als Erstem auf, dass Reibungskräfte hierfür verantwortlich sind. Das natürliche Bestreben eines Körpers jedoch ist es, seine Bewegung beizubehalten. Er verhält sich gewissermaßen träge, weshalb dieses Gesetz auch Trägheitsprinzip genannt wird. Ohne eine Krafteinwirkung bewegt sich ein Körper daher auf ewig mit derselben Geschwindigkeit in dieselbe Richtung fort.

Das zweite Gesetz legt die Dynamik von Bewegungen fest. Eine Kraft bewirkt bei einem Körper eine Änderung seiner Geschwindigkeit, also eine Beschleunigung. Daher ist wegen der Geschwindigkeitsänderung auch das Abbremsen eines Körpers für einen Physiker ein Beschleunigungsvorgang. Der Effekt einer Kraft hängt dabei von der Trägheit des Körpers ab, also seiner Masse. Mit dem dritten newtonschen Gesetz wird ausgedrückt, dass keine Kraft aus dem Nichts entsteht. Wirkt eine Kraft auf einen Körper, so ist dafür immer ein anderer Körper verantwortlich. Beide Körper beeinflussen sich somit gegenseitig.

Ist ein Körper mehreren Kräften aus verschiedenen Quellen ausgesetzt, so überlagern sich diese Kräfte ungestört und addieren sich. Bei der Berechnung der resultierenden Kraft müssen wir allerdings die Richtungen der Kräfte berücksichtigen. Gerichtete Größen wie Kräfte und Geschwindigkeiten werden wie in der Mathematik als Vektoren bezeichnet und ebenso behandelt. Bildlich ist ihre Addition nichts anderes als das Aneinanderlegen von Pfeilen. Im Gegensatz dazu gibt es auch ungerichtete Größen wie beispielsweise die Temperatur.

Eine wichtige Folgerung aus den newtonschen Gesetzen sind die *Erhaltungssätze* für Impuls und Drehimpuls. Da Erhaltungssätze eine absolut zentrale Rolle in der Physik einnehmen, müssen wir uns näher anschauen, was ein solcher Satz bedeutet.

Der *Impuls* eines Körpers ist das Produkt aus Masse mal Geschwindigkeit. Unter einem Impuls stelle ich mir immer die Heftigkeit einer Bewegung vor. Betrachten wir dazu den Zusammenstoß von Billardkugeln oder etwas uneleganter den von Autos. Ein schwerer oder schneller Körper wird einen leichten oder langsamen immer in seine Richtung wegschieben. Haben beide Autos jedoch denselben Impuls, aber mit entgegengesetzter Richtung, so bewegen sie sich nach dem Stoß gar nicht

mehr. Ihr Gesamtimpuls war vor und nach dem Zusammenstoß gleich null und hat sich somit überhaupt nicht verändert. Generell bleibt ohne eine Krafteinwirkung die Geschwindigkeit eines Körpers, und damit sein Impuls, für immer konstant. Dies gilt auch für ein System, das aus mehreren Körpern zusammengesetzt ist. Solange keine Kraft von außen auf die Autos wirkt, bleibt ihr Gesamtimpuls stets der gleiche. Er verändert sich nicht und bleibt somit erhalten.

Dasselbe gilt auch für Drehbewegungen. Hier bleibt der sogenannte *Drehimpuls* erhalten. Ihn kennen Sie von den Pirouetten beim Eiskunstlauf. Legt die Läuferin ihre Arme enger an den Körper, so wird ihre Drehbewegung schneller. Der Drehimpuls jedoch, ein Produkt aus dem Impuls der Körperteile und deren Abstand zur Drehachse, bleibt konstant. Beide Arten von Impuls können innerhalb eines Systems von Körpern also weder entstehen noch verschwinden. Sie sind immer gleich groß, solange das System nicht von außen beeinflusst wird. Dabei gilt natürlich auch der Umkehrschluss: Falls sich der Impuls oder Drehimpuls eines Systems von Körpern ändert, so ist dieses System nicht isoliert, sondern steht in Wechselwirkung mit einem weiteren Körper.

Diese Erhaltungssätze sind nicht die Einzigen, die uns im Laufe dieses Buches begegnen werden. Sie vermitteln uns Grundtatsachen über unsere Welt und machen das Universum berechenbarer. Und zwar nicht nur in dem Sinn, dass wir mit ihrer Hilfe unbekannte Größen in einem Experiment ermitteln können. Vielmehr sind sie Ausdruck der Verlässlichkeit, die uns das Universum als Lebensraum bietet. Ohne diese Gesetze wäre eine Milliarden Jahre andauernde Evolution, die einigermaßen Sinnvolles hervorbringt, kaum denkbar. Innerhalb dieses Prozesses haben schließlich Lebensformen die Gesetze entdeckt, die ihre Lebensgrundlage bilden. Zumindest sieht es so aus: Zuerst waren die Gesetze da, und dann kamen wir.

Die zweite große Leistung Newtons war die Aufstellung des *Gravitationsgesetzes*, das erst durch Einstein neu formuliert wurde. Mit einer einzigen Gleichung hat Newton die Ursache für so unterschiedliche Bewegungen wie das Fallen eines Apfels und den Umlauf des Mondes um die Erde beschrieben. Ob Newton seinen Geistesblitz wirklich unter einem Apfelbaum hatte, lässt sich heute nicht mehr klären. Entscheidend war jedoch das Zurückführen der Fall- und Planetenbewegung auf eine gemeinsame Ursache, wodurch die Naturbeschreibung stark vereinfacht wurde.

Als Kind dachte ich bestimmt wie viele andere auch, dass uns die Erde auf eine besondere Art und Weise anzieht. Erst spät lernte ich in der Schule eine Begründung für diese Schwerkraft kennen. Nicht die Erde ist etwas Besonderes, sondern *alle Massen ziehen sich an*. Und zwar immer, denn es gibt keine Abstoßung zwischen Massen. Die Massenanziehung oder Gravitation ist hierbei um so stärker je schwerer die beiden Massen sind und je näher sie sich beieinander befinden. Sie ist also proportional zu beiden Massen und umgekehrt proportional zu deren Abstand,

genauer zum Quadrat des Abstands. Wird eine der Massen verdoppelt, so verdoppelt sich auch die Kraft. Wird der Abstand um einen Faktor zwei verkleinert, so vergrößert sich die Kraft auf das Vierfache. Wie beim Federgesetz gibt es noch einen freien Parameter, der die eigentliche Stärke der Kraft bestimmt. Im Gegensatz zur Feder ist diese *Gravitationskonstante* G jedoch universell. Sie hat im gesamten Universum überall und zu jeder Zeit denselben Wert.

Die Erde zieht uns also mit derselben Kraft an, mit der auch wir die Erde anziehen. Da aber die Erde viel schwerer ist als wir, können wir diesen Effekt nicht bemerken. Die Massen der Körper sind demnach nicht nur ein Ausdruck für ihre Trägheit, sondern auch für ihre Schwere. Bei der allgemeinen Relativitätstheorie werden später wir auf diese beiden Eigenschaften von Massen zurückkommen.

Mit dem Gravitationsgesetz vollendete Newton die Forschungen von Galileo Galilei und Johannes Kepler (1571–1630). Galilei hatte die Fallgesetze und Kepler die Gesetze der Planetenbewegungen entdeckt. Für beide Vorgänge konnte Newton nun eine einheitliche Erklärung präsentieren. Sowohl Mond und Erde als auch Apfel und Erde ziehen sich gegenseitig an. Wegen seiner kleineren Masse jedoch fällt der Apfel beschleunigt zu Boden. Doch dabei bewegt er sich nicht nur auf die Erde zu, sondern die Erde kommt ihm auch unmerklich ein Stück entgegen.

Auch der Mond fällt streng genommen auf die Erde zu. Er hat bei seiner Entstehungsgeschichte vor mehr als 4 Milliarden Jahren allerdings eine hohe Bahngeschwindigkeit und damit einen hohen Drehimpuls erhalten. Da der Weltraum jedoch so leer ist, dass im Prinzip keine Reibungskraft auf den Mond wirkt, besitzt er diesen Drehimpuls auch heute noch. Er zieht deswegen noch immer seine Bahn um die Erde. Dies ist ganz typisch für Planeten- und Sternensysteme. Ein anfänglicher Drehimpuls kann sich nicht mit der Zeit in Luft auflösen, weshalb diese Systeme meist für alle Zeiten rotieren. Warum ein Drehimpuls jedoch bei der Entstehung eines solchen Systems fast immer vorhanden ist, schauen wir uns später an.



3 Mond und Apfel unterliegen dem gleichen Gravitationsgesetz.

Newton gelang es mit den Bewegungsgesetzen und dem Gravitationsgesetz, einen Großteil seiner damals bekannten Welt zu erklären. Er hatte aber auch, ohne es vielleicht zu beabsichtigen, ein *Weltbild* geprägt. Wendet man die Bewegungsgleichungen der Mechanik auf einen Körper an, so kann man seinen Bewegungszustand, also seinen Ort und seine Geschwindigkeit, für einen beliebigen Zeitpunkt berechnen. Das heißt, dass die Bahn eines Körpers und seine Geschwindigkeit nicht nur für die Zukunft festgelegt sind, sondern dass sie sich auch in die Vergangenheit zurückverfolgen lassen. Und dies mit scheinbar minimalen Voraussetzungen: Man muss lediglich den Ort und die Geschwindigkeit eines Körpers zu einem einzigen Zeitpunkt kennen, die sogenannten Anfangsbedingungen. Als weitere Zutat müssen noch die Kräfte bekannt sein, die auf den Körper einwirken. Nach diesem Rezept können wir beispielsweise berechnen, wo der Mond in 1000 oder vor 1000 Jahren am Himmel stehen wird oder stand.

Die Gleichungen der Mechanik enthalten keinerlei Spielraum für Abweichungen von diesem Verhalten. Sie sperren das Universum in ein Korsett, aus dem es kein Entrinnen gibt. Die Bewegungen aller Körper sind für alle Zeit besiegelt. Würde jemand gar den Bewegungszustand *aller* Körper zu einem bestimmten Zeitpunkt feststellen, so wäre ihm der komplette Ablauf der Welt bekannt. Hier gibt es keinen Platz für Zufälligkeiten oder, wie es oft kritisiert wurde, für einen freien Willen. Die newtonsche Mechanik führte zu dem fatalen Bild von der Welt als Uhrwerk. Gott hat als Schöpfer die Welt wie eine Uhr gebaut und anschließend aufgezogen. Mit dem festgelegten Anfangszustand läuft die Uhr los, und Gott braucht nur zuzuschauen, denn er hatte ja schon alles geplant. So mächtig dieses Modell auch ist, so erdrückend ist es gleichzeitig, und so falsch.

Auch heute noch verdankt die Physik diesem Modell den Ruf, eine Wissenschaft zu sein, die alles berechnen und vorhersagen kann. Und ich denke, dass dieses Weltbild von den Physikern zumindest unterschwellig auch gepflegt wurde, denn es verleiht ihnen die Macht über die Zukunft. Erst in den 1920er Jahren wurde es durch die Quantentheorie entscheidend korrigiert, dafür aber gleich so heftig, dass wir die Nachbeben dieser Revolution auch heute noch spüren. Sie krepelte die Physik in weiten Teilen so stark um, dass wir heute die früheren Theorien als *klassisch* bezeichnen. Der Begriff *klassisch* bezieht sich dabei auf den Aspekt, dass der Weltenlauf völlig festgelegt ist. Demnach wird auch die newtonsche Mechanik als *klassische Theorie* bezeichnet.

Das Geschehen in der klassischen Mechanik lässt sich mit einer Aufführung in einem Theater vergleichen. Das Theaterstück liegt fix und fertig vor und der Regisseur duldet keine Abweichungen vom vorgegebenen Ablaufplan. Die Bühne wird gebildet aus Raum und Zeit, die beide von Newton als unveränderlich angenommen wurden. Raum und Zeit bilden den Hintergrund der Inszenierung und können von der Handlung auf keinerlei Weise beeinflusst werden. Da sie einfach nur vorhanden

sind, spricht man auch vom *absoluten Raum* und von der *absoluten Zeit*. Egal, welche Akteure sich durch den Raum bewegen, der Raum merkt davon nichts. Und auch die Zeit fließt immer gleichmäßig dahin und nimmt nicht am Geschehen teil.

Auf dieses Bild werde ich jedes Mal zurückkommen, wenn ich das Wesentliche einer Theorie verdeutlichen möchte. Mit seiner Hilfe möchte ich die Unterschiede zwischen den Theorien herausarbeiten, wobei Sie alle diese Abschnitte auch im Anhang finden. Hier noch einmal in Kurzform:

Klassische Mechanik:

Das Geschehen im Universum ist im Vorhinein in allen Einzelheiten festgelegt. Von diesem Ablauf gibt es keine Abweichungen. Als Hintergrund dient eine unveränderliche Bühne aus Raum und Zeit.

Diese klassischen Vorstellungen prägen ganz stark unser Denken. Schon als Kleinkinder erleben wir geregelte Abläufe, die eine Ordnung in unser Denken bringen. Auch in der Schule und ebenso im Studium kommen wir wieder als Erstes mit den klassischen Gesetzen in Berührung. Sie sind zwar einfach zu verstehen, gelten aber nur näherungsweise. Genau genommen sind sie schlicht und ergreifend falsch. Mühsam und unter Protest müssen wir später unsere Vorstellungen korrigieren, zumindest wenn wir es genauer wissen wollen. Ich hielte es für wünschenswert, wenn wir in unserem Bildungssystem etwas früher gegensteuern würden. Warum können wir unseren Kindern nicht erklären, dass dieses klassische Modell nur die halbe Wahrheit ist? Und warum können wir nicht zumindest umreißen, worin die volle Wahrheit besteht, die wir uns später ausführlich ansehen werden?

Das Weltbild der klassischen Mechanik enthält noch einen weiteren wichtigen psychologischen Aspekt, den man nicht unterschätzen sollte: *die Berechenbarkeit zukünftiger Ereignisse*. Ist sie gegeben, so fühlt man sich zumindest unbewusst mächtig und einflussreich, denn man ist ja in die Geheimnisse der Natur eingeweiht. Falls diese Vorhersagekraft in neueren Weltmodellen nicht mehr vorhanden ist, so kann es leicht passieren, dass man sich instinktiv dagegen zur Wehr setzt.

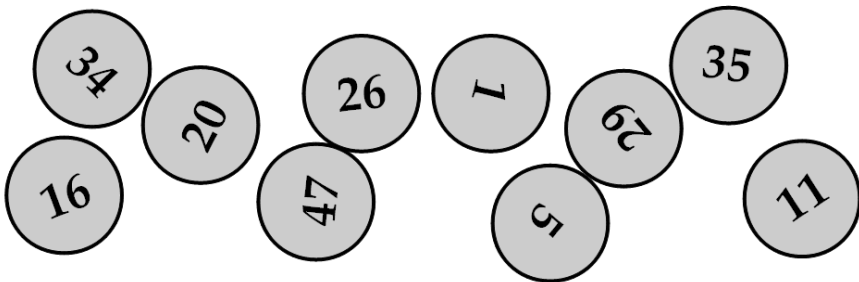
Aber schon die newtonsche Mechanik hat ihre liebe Not mit der Berechenbarkeit der Zukunft. Zwar ist sie prinzipiell immer gegeben, aber längst nicht bei allen Problemstellungen auch von praktischem Wert. Tatsächlich kann man nur für ganz einfache Konstellationen das Verhalten von mehreren Körpern auch mit einer mathematischen Formel beschreiben. Für die Bewegung des Mondes um die Erde ist dies möglich. Als Lösung für dieses Problem erhält man eine keplersche Ellipsenbahn. Versucht man dieselben Gleichungen aber auf drei gleich schwere Körper anzuwenden, so lässt sich keine allgemeine Lösung mehr aufstellen. Nur mit zusätzlichen Vereinfachungen ist dieses sogenannte Dreikörperproblem über eine Formel lösbar.

Wenn man mit diesen direkten, sogenannten analytischen Mitteln nicht mehr weiterkommt, hilft nur noch der Umweg über numerische Verfahren. Hierbei bildet man die Fragestellung mathematisch in einem Computer ab. Ausgehend von einer festgelegten Anfangskonstellation rechnet man in kleinen Zeitschritten vorwärts. Bei jedem Schritt wendet man die wirkenden Kräfte auf die Körper an und verändert dementsprechend ihre Geschwindigkeiten. Mit diesen Geschwindigkeiten lässt man dann die Körper bis zum nächsten Zeitschritt fliegen. Auf diese Weise simuliert man einen Bewegungsablauf. Sind die Zeitschritte klein genug gewählt, so ergibt sich eine nahezu durchgängige Bewegung, die der Realität sehr nahe kommen sollte. Dabei stößt man allerdings auf das nächste Problem, das sich für die Berechnung etlicher Naturvorgänge als K.-O.-Kriterium herausstellt.

Je nach Problemstellung können sich bereits aus kleinsten Abweichungen von der Ausgangskonstellation der Körper nach einer gewissen Zeit riesige Unterschiede im Verlauf der Bahnen ergeben. Auch die Größe der gewählten Zeitschritte spielt dann für das Ergebnis eine entscheidende Rolle. Ein Vorgang, den wir alle kennen, soll uns dies verdeutlichen: die Ziehung der Lottozahlen. Selbst wenn alle Kugeln immer auf die gleiche Art und Weise losgelassen werden, so wird doch stets ein anderes Ergebnis dabei herauskommen. Die Zusammenstöße der 49 Kugeln ergeben ein so komplexes Spiel, dass uns selbst die Einbeziehung der Schwerkraft *zwischen* den Kugeln bei einer Computersimulation nicht weiterhilft. Nach wenigen Sekunden wird jede Rechnung unweigerlich so weit vom wirklichen Geschehen abweichen, dass nur noch Abwarten und Zuschauen zum korrekten Ziehungsergebnis führen werden. Doch warum ist dies so? Gelten die newtonschen Gleichungen etwa nicht exakt?

Selbst wenn wir dies einmal annehmen, so ist das eigentliche Problem doch ein ganz anderes. Um eine exakte Vorhersage machen zu können, müssen wir dazu auch die Ausgangsbedingungen aller beteiligten Körper mit absoluter Genauigkeit kennen. Dies ist aber in der Praxis nie möglich. Alles, was wir über die Lage und die Geschwindigkeit eines Körpers in Erfahrung bringen können, besitzt eine gewisse Ungenauigkeit. Und diese Ungenauigkeit wirkt sich bei vielen Fragestellungen fatal aus. Egal, wie klein und unbedeutend die Abweichung zwischen der wahren Position eines Körpers und die, mit der wir rechnen, anfangs auch sein möge, sie verstärkt sich im Laufe der Rechnung so weit, dass am Ende ein ganz anderes Ergebnis dabei herauskommt. Die Vorhersagekraft der Gleichungen bricht für manche Probleme zusammen, weil wir die Ausgangsbedingungen niemals genau genug kennen können. Ob dies nur an unserem Wissen liegt oder ob es für Positionen und Geschwindigkeiten eine prinzipielle Genauigkeitsgrenze in der Natur gibt, sehen wir uns im zweiten Teil dieses Buches an.

Obwohl die Gleichungen zwar exakt festlegen, wie sich die Körper bewegen, so nützt uns dies oft nichts, da wir die Ausgangsbedingungen nicht mit absoluter



- 4 Die Ziehung der Lottozahlen lässt sich zwar im Prinzip berechnen, aber die Vorhersagekraft dieser Rechnung ist gleich null.

Genauigkeit kennen. Betrachtet man bei einem Körper zwei mögliche Bahnen, die anfangs unendlich nahe beieinanderliegen, so laufen diese mit der Zeit so weit auseinander, dass wir nichts mehr daraus schließen können. Man kann beispielsweise ein Dreikörperproblem oder die Ziehung der Lottozahlen numerisch simulieren, aber welchen Wert hat diese Rechnung? Dabei ist es völlig egal, ob wir einen Computer mit den Daten füttern oder selbst mit Bleistift und Papier arbeiten. Verlässliche Rechnungen für diese Art von Fragestellungen sind einfach nicht möglich.

Man bezeichnet solch ein Verhalten als festgelegtes oder *deterministisches Chaos*. Dabei bedeutet Chaos aber alles andere als Regellosigkeit, sondern die Unmöglichkeit, den zukünftigen Zustand eines Systems vorherzubestimmen. Deterministisches Chaos tritt in der Natur öfter auf, als uns das meist bewusst ist. Schon ein stark tropfender Wasserhahn kann sich chaotisch verhalten. Jede turbulente Strömung, sei es in einem rauschenden Bach oder bei der Bildung einer Gewitterwolke, ist ebenfalls chaotisch.

Meines Erachtens weist uns das deterministische Chaos auf ein tiefes Geheimnis unserer Welt hin. Wir können die Welt zwar verstehen und begreifen, in dem wir ihre Gesetzmäßigkeiten aufdecken, aber das heißt noch lange nicht, dass sie deshalb auch berechenbar ist. Ich gehe aber noch weiter und halte sie prinzipiell für unberechenbar. Zwischen dem Verständnis und der Berechenbarkeit des Universums liegen buchstäblich Welten. Oder anders ausgedrückt: Die Natur lässt sich bei künftigen Ereignissen nicht in die Karten sehen. Wir können sie verstehen und beobachten, aber nicht vorhersagen. Später wird uns die Quantentheorie noch viel deutlicher diese Grenzen aufzeigen.

Ein meiner Freunde hat einmal halb im Scherz gefragt, was uns ein Naturgesetz eigentlich nützt, wenn wir damit nichts berechnen können. Macht dieses Gesetz dann überhaupt Sinn? Ich habe wohl geantwortet, dass ein Naturgesetz ja nicht unbedingt darin begründet sein muss, dass wir damit etwas berechnen können. Es regelt einen Ablauf in der Natur, und darauf kommt es an. Ob dies immer zu einer mathematisch einfachen Lösung führt, die auch sicher die Zukunft beschreibt, ist

völlig zweitrangig. Wir können demnach die Natur verstehen und begreifen, aber bei vielen Fragestellungen entzieht sie sich unseren Bemühungen, sie zu berechnen. Und dies liegt nicht etwa an unseren begrenzten mathematischen Techniken, sondern an den Naturvorgängen selbst. Auch wenn es uns nicht leicht fällt, so sollten wir uns damit abfinden, dass wir nicht alles vorausberechnen können. Was sollte uns denn wichtiger sein: *Verständnis oder Vorhersagekraft?*

Obwohl wir die Lottozahlen nicht im Voraus berechnen können, so würde doch niemand behaupten, dass wir die Ziehung der Lottozahlen nicht verstanden hätten. Alle beteiligten Körper und alle Kräfte, die zwischen ihnen wirken, sind uns bekannt. Aber erst die praktische Unmöglichkeit der Vorhersage stellt die Chancengleichheit aller Spieler sicher.

Trotz dieser Einschränkungen halte ich Simulationsrechnungen für ausgesprochen wichtig. Beim Wetter und Klima sind sie unabdingbar, und ich habe großen Respekt vor denjenigen, die sie durchführen. Natürlich kosten die dafür notwendigen Supercomputer eine Menge Geld, doch werden die physikalischen Modelle fortwährend verfeinert und damit die Vorhersagekraft gesteigert. Ungeachtet dessen haben aber viele Modelle unüberwindbare Grenzen. Obwohl wir beispielsweise bei der Wettervorhersage in den letzten Jahrzehnten immense Fortschritte gemacht haben, wird kein Meteorologe jemals vorhersagen können, ob es in einem Monat an einem bestimmten Ort regnet oder nicht. Eine solche Prognose lässt das Wetter nicht zu, weil das Wetter ein chaotisches Geschehen ist und weil der Zeitraum dafür einfach zu lang ist.