

22 Veränderungen

Es ist unmöglich, zweimal in denselben Fluss zu steigen.

Heraklit, Philosoph

Um uns herum ändern sich andauernd viele verschiedene Dinge. Einige dieser Veränderungen geschehen in äußerst kurzen Zeitspannen, zahlreiche vollziehen sich für unser Empfinden innerhalb ganz normaler Zeiträume und wieder andere benötigen unvorstellbar lange. Atome trennen und verknüpfen sich bei einer Verbrennung in einer Kerzenflamme, Wolken entstehen und regnen sich ab, Pflanzen wachsen und blühen, Tierarten bilden sich heraus und Gebirge falten sich auf. Sterne werden geboren und vergehen auf unterschiedliche Arten, ja selbst das gesamte Universum hatte zumindest einen Anfang. Auch in unserem Körper verändert sich ständig alles Mögliche. Wir atmen ein und aus, das Blut zirkuliert in unseren Adern, unsere Nahrung wandert durch den Verdauungstrakt und neue Verknüpfungen entstehen in Ihrem Gehirn, wenn Sie dies lesen. Im gesamten Universum finden unablässig Veränderungsprozesse statt. Aber wie laufen diese Vorgänge eigentlich ab?

Prinzipiell bieten sich hier zwei Möglichkeiten an, die auch beide in den physikalischen Theorien vertreten sind. Die erste ist eine sanfte, durchgängige und *stetige* Änderung und die zweite geschieht plötzlich, *sprunghaft* und spontan. Ein Beispiel für eine stetige Änderung ist die Flugbahn eines Speeres. Der Ort seiner Spitze bewegt sich nach den Gesetzen der Mechanik oder der allgemeinen Relativitätstheorie kontinuierlich durch den Raum. Zu jeder Zeit befindet sich der Speer an einem ganz bestimmten Punkt, der zu einem späteren Zeitpunkt etwas weiter vorgerückt ist. Dabei darf der Zeitunterschied zwischen jetzt und nachher beliebig klein sein. Stets beschreiben die mechanischen Gleichungen die Lage der Speerspitze mit absoluter Sicherheit. Alle Größen dieser Bewegung müssen daher durch unendlich lange und damit unendlich genaue Kommazahlen ausgedrückt werden.

Ganz anders verhalten sich die Energien und der Spin eines Elektrons in einem Atom. Hier sind nur wenige Werte erlaubt. Dazwischen liegende Ausprägungen kommen in der Natur nicht vor. Die Änderungen zwischen diesen Zuständen geschehen sprunghaft. Nimmt ein Elektron die Energie eines Photons auf, so wird es auf ein höheres Energieniveau gehoben. Das Lichtteilchen wird dabei als Ganzes absorbiert und die Energie des Elektrons sofort verändert. Gleichzeitig geschieht dies nicht nur sprunghaft, sondern auch noch unvorhersagbar, also spontan. Da diese Veränderungen nicht beliebig klein sein können, lassen sie sich statt mit Kommazahlen bequem mit ganzen Zahlen ausdrücken. Wie beim Abzählen von Fin-

gern unterscheiden sie sich stets um mindestens eins. Bevor wir uns aber mit diesen verschiedenen Arten von Veränderungen näher auseinandersetzen, möchte ich die Abstraktion noch eine Stufe weiter treiben.

Wir stellen uns die einfache Frage, wie man überhaupt *Veränderungen* feststellen kann? Um dies leisten zu können, benötigen wir immer einen Vergleich zwischen mindestens zwei Werten. Wenn sich eine Messgröße ändert, so können wir dies nur feststellen, wenn wir einen ihrer Werte mit einem anderen vergleichen. Mit einer einzelnen Zahl können wir niemals eine Änderung registrieren. Verschiedene Ausprägungen der gleichen Größe müssen also zu *unterschiedlichen* Zeiten erfasst werden. Dies bedeutet, dass eine Änderung eines Messwertes nur durch eine Gegenüberstellung von Ergebnissen bemerkt werden kann, die zu verschiedenen Zeiten erhoben werden. Ohne dass eine gewisse Zeit zwischen verschiedenen Beobachtungen vergeht, ist eine Veränderung also gar nicht denkbar. Der Ablauf der Zeit ist demnach die Voraussetzung für Änderungen. Oder ist es etwa umgekehrt?

Messen wir die *Zeit* nicht genau dadurch, dass wir Veränderungen registrieren? Um Zeit messen, beobachten wir die Drehung der Erde um sich selbst, die Bewegungen der Zeiger einer Uhr oder die Reflexion eines Lichtstrahls zwischen zwei Spiegeln. Dabei bedienen wir uns möglichst periodischer Vorgänge, um Zeitspannen zu messen, sodass wir die Zyklen der Vorgänge nur abzählen müssen. Jedoch können wir die Gleichartigkeit der Zeitabschnitte eines Vorgangs streng genommen noch nicht einmal beweisen. Dies lässt sich wiederum nur durch einen Vergleich mit einem anderen Vorgang belegen. Jedenfalls kann Zeit nur gemessen werden, in dem wir Änderungen ermitteln und aufzeichnen. Ohne eine einzige Veränderung in unserer Umgebung oder in unserem Körper bliebe die Zeit einfach stehen. Es würde dann überhaupt keine Zeit vergehen. Ist demnach jegliche Art von Veränderung die Voraussetzung für die Zeit?

Haben wir uns etwa gerade in einem logischen Zirkelschluss verheddert? Was ist denn nun die Voraussetzung für das jeweils andere: die Zeit oder die Veränderung? Ich denke, wir kommen aus diesem Dilemma von Voraussetzungen nur heraus, wenn wir anerkennen, dass beide absolut gleichwertig sind. *Zeit ist durch Änderungen gekennzeichnet, und Änderungen können ohne Zeit nicht stattfinden.* Geschehen gar keine Änderungen, so bleibt die Zeit stehen. Und vergeht keine Zeit, dann ändert sich auch nichts.

Aber in der Natur und in unserem Leben gibt es nicht nur Veränderungen, sondern auch Dauerhaftes und *Beständigkeit*. Wenn sich zu jedem Zeitpunkt wirklich alles ändern würde, so könnte sich kaum so etwas wie Leben herausbilden. Nicht einmal ein fester Körper könnte existieren. Nur weil viele Größen über die Zeit hinweg nahezu konstant sind, können sich geordnete Strukturen herausbilden. Die Natur-

gesetze haben sich, soweit wir wissen, seit dem Urknall überhaupt nicht verändert. Die Länge eines Tages vergrößert sich während unseres Lebens gerade mal um eine tausendstel Sekunde und auch die Sonneneinstrahlung ist innerhalb gewisser Grenzen immer dieselbe. Ebenso sieht auch mein Schreibtisch noch genauso aus, wie ich ihn das letzte Mal verlassen habe. Um eine *Gleichheit* aber sicher feststellen zu können, brauchen wir auf jeden Fall ein *Maß*, das uns angibt, unter welchen Umständen wir eine Größe als gleich betrachten.

Dazu haben wir für alles um uns herum Gleichheitskriterien entwickelt, ohne die wir im Leben nicht zurechtkämen. Nur mit ihrer Hilfe können wir Wichtiges von Unwichtigem unterscheiden, denn für das Überleben in der Evolution ist es entscheidend, dass wir die wesentlichen Veränderungen entdecken und den Rest als gleichartig beiseitezuschieben. Obwohl meine Haare über Nacht gewachsen sind, erkenne ich mich noch im Spiegel. Und einen Kirschbaum bezeichnen wir nicht deshalb als etwas anderes, nur weil er im Sommer Früchte trägt oder im Winter keine Blätter mehr hat. Nicht einmal ein Vulkan bekommt einen neuen Namen, nur weil seine Spitze bei einem Ausbruch weggesprengt worden ist, denn schließlich steht er ja noch am selben Ort.

Auch alle Begriffe unserer Sprachen haben sich anhand von Vergleichen herausgebildet. Ein Stuhl beispielsweise kann aus verschiedenen Materialien bestehen, unterschiedlich hoch sein und drei, vier oder mehr Beine haben. Trotzdem sind wir uns sicher, dass wir einen Stuhl von einem Tisch unterscheiden können. Diese unausgesprochenen Gleichheitsmerkmale geben unserer Sprache die nötige Beständigkeit, sodass eine Mitteilung mit einer gesicherten Bedeutung erfolgen kann.

Aber Gleichheit kann auch exakt erfüllt sein. Mein Kontostand ist bis auf den Cent genau noch derselbe, solange keine Abbuchung oder Gutschrift erfolgt. Ebenso wird sich der Energiezustand eines Elektrons in einem Atom nicht ändern, solange es kein Licht aussendet oder absorbiert. Wie oft wir auch nachsehen, wir werden bei gewissen Größen immer präzise den gleichen Wert feststellen. Die Voraussetzung dafür ist allerdings, dass in der Zwischenzeit nichts passiert ist. Falls aber doch, dann ist die Änderung in diesen Fällen sprunghaft und nicht stetig. Kein Betrag unterhalb von einem Cent kann gebucht oder ausgezahlt werden und irgendwelche Energieniveaus zwischen den erlaubten sind bei einem Atom noch nie gemessen worden.

Das Bemerkten von Veränderungen ist also ganz eng verbunden mit dem Erkennen von Beständigkeit und Gleichheit. Nur wenn klar ist, wann etwas gleich ist, kann man eine Abweichung von der Gleichheit und damit eine Veränderung feststellen.

Wenn wir etwas tiefer über diesen Sachverhalt nachdenken, so können zu dem *Begriffspaar* der Gleichheit und Veränderung noch weitere grundlegende hinzu-

fügen. Die Wichtigsten sind: ganz und geteilt, verbunden und getrennt, ganzheitlich und zusammengesetzt, ruhig und bewegt, symmetrisch und asymmetrisch, langweilig und interessant, belebt und unbelebt. Sie alle spannen fundamentale Gegensätze auf, auf denen unsere Welt beruht. Aber oft können wir noch nicht einmal eine strenge Unterscheidung zwischen den Begriffen eines dieser Paare vornehmen. Ich möchte dies kurz an ein paar Beispielen erläutern.

Wir leben in einer einzigen zusammenhängenden Welt, einem Universum. Um uns darin zurechtzufinden, teilen wir es aber in Galaxien, Sterne, Körper, Atome und Elementarteilchen auf. Nach dieser Trennung in Bestandteile fügen wir sie jedoch quasi wieder zusammen. Diesen Zusammenhang zwischen den Teilen stellen wir mittels Kräften, Feldern und Austauschteilchen wieder her. Doch wie locker oder fest ist dieser Zusammenhalt? Wir haben am Beispiel der Atome und Protonen gesehen, dass diese zwar Bestandteile besitzen, aber trotzdem als ein Ganzes aufgefasst werden müssen. Sind nun die übrigen Teile des Universums eher vom Rest getrennt oder eher mit ihm verbunden? Mit anderen Worten: Sollte man auch das Universum eher als Ganzes oder als die Summe seiner wechselwirkenden Teile ansehen?

Ein weiterer Gegensatz, den ich hier ebenfalls nur anschnitten möchte, ist der zwischen belebt und unbelebt oder lebendig und tot. Wir fühlen uns ganz klar als lebendige Wesen, aber je genauer wir hinsehen, desto mehr ist klar, dass wir lediglich aus chemischen Verbindungen bestehen. Diese wechselwirken zwar sehr komplex miteinander, können aber nicht mit gutem Gewissen als lebendig bezeichnet werden. Des Weiteren nehmen wir über die Luft und unsere Nahrung ständig unbelebte Materie auf und scheiden ebenso tote Materie wieder aus. Wo oder wie sollen wir lebendig von tot abgrenzen? Auch das Leben insgesamt hat sich nach allem, was wir wissen, vor Jahrmilliarden aus unbelebter Materie entwickelt, und dieser Übergang war ganz sicher über einen langen Zeitraum sehr fließend. Wann genau ist also das Leben auf der Erde entstanden?

Wir werden diese Frage nachträglich niemals beantworten können, aber selbst wenn wir damals als Beobachter dabei gewesen wären, wäre uns dies nicht gelungen. Wir hätten dazu alle chemischen Reaktionen auf dem ganzen Planeten Erde im Blick haben müssen. Und vor allem hätten wir ein eindeutiges Unterscheidungsmerkmal benötigt. Tatsächlich landet man jedes Mal, wenn man versucht eine harte Grenze zwischen belebt und unbelebt zu definieren, in einer logischen Fallgrube. Eine strenge und damit wasserdichte Unterscheidung kann daher meines Erachtens gar nicht getroffen werden.

Auch das so unschuldige Begriffspaar ruhig und bewegt ist problematisch. Wie kann man beispielsweise einen Ruhezustand von einer gleichförmigen Bewegung unterscheiden? Laut Relativitätstheorie gibt es hierfür keine Möglichkeit, denn alle Beobachter sind gleichberechtigt, der im fahrenden Zug genauso wie der am Bahn-

steig. Ein absoluter Beobachter an einem ruhenden Punkt im Universum scheint nicht möglich zu sein. Doch bietet uns das Universum eventuell doch eine sichere Abgrenzung von Ruhe und Bewegung? Und wenn ja, was bedeutet dies für die Relativitätstheorie? Näheres dazu in Kapitel 33.

Ein letztes Beispiel für einen grundlegenden Gegensatz geben uns die Erhaltungssätze der Physik. Man kann beweisen, dass sie alle auf fundamentale Symmetrien im Universum zurückgehen, was wir uns genauer in Kapitel 32 ansehen. Eine Symmetrie ist dabei immer durch eine gewisse Gleichartigkeit gekennzeichnet. Ein Quadrat sieht nach einer Drehung um 90 Grad stets genauso aus wie vorher. Ein Kreis dagegen ist sozusagen immun gegen Drehungen, denn er besitzt eine vollkommene Drehsymmetrie um seinen Mittelpunkt. So wie ein Kreis im Grunde zwar ebenmäßig und gleichförmig aussieht, so langweilig und uninteressant ist er bei Drehungen.

Ganz ähnlich ist es um unser Universum bestellt. Aus den Symmetrien, die streng vorliegen, ergeben sich die Erhaltungssätze, die ihm seine Verlässlichkeit einhauchen. Wenn aber alle Symmetrien absolut vollkommen wären, so wäre unsere Welt langweilig und ereignislos. Stattdessen sind einige der Symmetrien leicht verletzt, denn ohne diese Brechung von bestimmten Symmetrien wären wir gar nicht da. Wir und das gesamte überblickbare Universum bestehen nämlich aus Materie. Wären Materie und Antimaterie aber bei der Entstehung des Universums absolut gleichberechtigt gewesen, dann wäre nichts Stoffliches in unserer Welt vorhanden, sondern nur reine Energie. Stattdessen ist diese Materie-Antimaterie-Symmetrie gebrochen, und zwar um ein winziges Bisschen zugunsten der Materie-seite.

Warum aber sind nun einige Symmetrien perfekt und andere gebrochen? Und wie groß ist die Stärke der jeweiligen Brechung? Hier können wir zwar im Rahmen unserer Messgenauigkeiten gut zwischen einer erhaltenen und einer gebrochenen Symmetrie unterscheiden, doch fragen wir uns zwangsläufig wer oder was diese Auswahl getroffen hat? Wir werden in den letzten Kapiteln dieses Buches erneut diese schwierige und rätselhafte Frage aufgreifen.

Doch nun zurück zum Titel des Kapitels: Wie vollzieht die Natur nun wirklich die Änderung einer physikalischen Größe? Geschieht dies grundsätzlich unendlich fein und kontinuierlich wie in der Relativitätstheorie oder nur um feste Beträge und sprunghaft wie in der Quantentheorie? Benötigt die Natur für eine Größe wie den Ort einer Speerspitze jederzeit eine unendlich lange Kommazahl oder geht es auch mit weniger Information?

Natürlich werden wir niemals eine physikalische Größe mit unendlicher Präzision messen können, aber gibt es eine generelle Genauigkeitsgrenze für Beobachtungen? Steckt also in jeder Messgröße prinzipiell eine unendlich große Menge an

Information oder nur eine begrenzte Anzahl von Bits? Bevor wir uns diesem Themenkomplex zuwenden werden, möchte ich zunächst die Frage erörtern, welche der Theorien fundamentaler ist, die Quantentheorie oder die allgemeine Relativitätstheorie?

Die Frage scheint schon von vorneherein entschieden, da die Quantentheorie die Welt im Kleinen beschreibt. Sie sollte deshalb grundlegender sein, weil das Kleine das Große aufbaut. Doch ganz so einfach möchte ich es mir nun doch nicht machen, denn schließlich bemerken wir im Alltag rein gar nichts von den Eigenheiten der Quantentheorie. Die Welt ist in dieser Beschreibung auf fundamentale Weise unbestimmt, denn die Quantentheorie macht nur Wahrscheinlichkeitsaussagen für zukünftige Ereignisse.

Wir erinnern uns an die Menge von radioaktiven Atomen. Sie besitzt zwar eine Halbwertszeit, die wiederholbar gemessen werden kann, doch ein einzelnes Atom zerfällt zu einem völlig unbestimmten Zeitpunkt. Der Ausgang eines elementaren Vorgangs ist nach der Quantentheorie weder vorher festgelegt noch vorhersagbar und wird per Zufall entschieden. Dieser herbe Verlust an Berechenbarkeit ist auch heute noch der Grund, warum die Quantentheorie so schwer akzeptiert wird. Und dies, obwohl die Tatsachen eindeutig für sie sprechen.

Carl Friedrich von Weizsäcker bezeichnete dies als Trauerarbeit, die noch nicht vollständig geleistet ist. Seit Newton konnte in der Physik im Grunde das Ergebnis jedes Vorgangs berechnet werden. Die Physiker waren die mächtigen Herren der Welt, bis auf solche Beispiele wie die Ziehung der Lottozahlen, die man möglichst wenig beachtete. Und nun sollte das auf einmal wegen der Quantentheorie nicht mehr gelten?

Wie ich aber schon bemerkt habe, schließt ein komplettes Naturverständnis nicht automatisch die vollständige Vorhersagbarkeit der Natur mit ein. Wenn man sich von der absoluten Berechenbarkeit der Zukunft verabschiedet, kommt man auch gut mit der Quantentheorie klar. Sie wirklich tief greifend zu erfassen, ist das Ziel der nächsten Kapitel. Und das, obwohl schon sehr prominente Physiker behauptet haben, dass dies gar nicht möglich sei.

Richard P. Feynman (1918–1988), der ausgesprochen wichtige Arbeiten zur Quantentheorie und Teilchenphysik geleistet hat, wird gerne mit dieser Ansicht zitiert. Doch Feynman hat gleichzeitig betont, dass man stellvertretend für die gesamte Quantentheorie nur ein einziges Experiment begreifen müsste. Und genau diesen Versuch schauen wir uns nun an. Es ist der Doppelspaltversuch, auf den wir schon im Kapitel über Licht einen kurzen Blick geworfen haben (Kapitel 6).