

doch am Horizont der Wissenschaften durchaus Anzeichen, die Anlass zur Hoffnung geben. So haben uns neuere Forschungsergebnisse der Physik, insbesondere der Chaostheorie und der Theorie der Selbstorganisation, einen tiefen Einblick in das gesetzmäßige Verhalten einzigartiger Entwicklungsprozesse vermittelt. Des Weiteren zeigen die Anwendungen der Spieltheorie auf komplexe menschliche Entscheidungssituationen, dass bis zu einem gewissen Grad die Auswirkungen intentionalen Handelns doch berechenbar sind. Schließlich liefern Wissenschaften wie die Biologie oder die Meteorologie eindrucksvolle Belege dafür, dass geschichtliche Vorgänge in der Natur, die von unfassbarer Komplexität sind, durchaus der kausal-analytischen Methode zugänglich sind.

In Anbetracht dieser Fortschritte erscheint es durchaus sinnvoll, einmal zu untersuchen, inwieweit sich das Phänomen der Geschichtlichkeit mit wissenschaftlicher Strenge modellieren lässt. Um genau zu sein: Es geht hier nicht darum, geschichtliche Ereignisse in ihren vielfältigen und einzigartigen Erscheinungsformen gesetzmäßig zu erklären; vielmehr soll im Folgenden ausschließlich das Wesen, und zwar die Eigenart und die Struktur des historischen Geschehens aus der Perspektive der exakten Wissenschaften, beleuchtet werden.

## Das Wesen der Geschichtlichkeit

Eine Grundbeschaffenheit unserer Welt ist zweifellos die Zeitlichkeit allen Geschehens, wie sie ihre Spuren in einer unübersehbaren Zahl historischer Dokumente hinterlassen hat. Doch in der bloßen Zeitlichkeit erschöpft sich noch nicht das Wesen historischer Vorgänge. Vielmehr gehört dazu auch die Tatsache, dass sie sich nie wieder in allen Einzelheiten wiederholen können. Die Einzigartigkeit, Individualität und Besonderheit des geschichtlichen Geschehens ist neben der Zeitlichkeit das zweite hervorstechende Merkmal von Geschichtlichkeit. Da jeder Vorgang in der Welt diese Eigenschaften hat, ist letztlich alles Geschehen geschichtlicher Natur.

Nun sind dies elementare Einsichten, die zum Grundbestand menschlicher Erfahrung gehören. Umso mehr muss man sich wundern, dass die Physik, die sich doch als eine Erfahrungswissenschaft versteht, in ihren mathematischen Modellen so tut, als gebe es Prozesse, die im strengen Sinn reversibel und reproduzierbar sind. Mit der Annahme, das natürliche Geschehen sei reversibel, wird die Geschichtlichkeit des Geschehens einfach ausgeblendet. Stattdessen tritt in den physikalischen Grundgleichungen die Zeit als ein ungerichteter mathematischer Parameter auf, der nur noch die Eigenschaft eines Zählmaßes hat.

Da in der reversiblen Physik die Zeitlichkeit der Welt und damit die Scheidung von Vergangenheit und Zukunft völlig aufgehoben ist, kann beispielsweise ein Dachziegel, der vom Dach fällt, jederzeit seine Richtung umkehren und sich wieder in seine Ausgangsposition bewegen. Die Bewegungsgleichungen der klassischen Mechanik lassen jedenfalls eine solche surrealistisch anmutende Welt zu. Obwohl derartige Vorgänge in einem eklatanten Widerspruch zu unserer Erfahrung stehen, hat sich die Physik reversibler Vorgänge zur Beschreibung der Wirklichkeit hervorragend bewährt.

Das Naturbild, das mit dem Konzept der Reversibilität einhergeht, ist das Bild einer zeitsymmetrischen und damit geschichtslosen Wirklichkeit. Erst mit der Entdeckung des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik wurde auch ein Naturprinzip formuliert, das der Nichtumkehrbarkeit und damit der Zeitlichkeit des natürlichen Geschehens Rechnung trägt. Danach können in einem abgeschlossenen System, das heißt in einem System, das weder Energie noch Materie mit seiner Umgebung austauscht, nur solche Prozesse von selbst ablaufen, bei denen die Entropie zunimmt. Durch das Entropieprinzip wird folglich die Richtung spontan verlaufender Naturvorgänge festgelegt, wobei die Stärke der Entropiezunahme ein direktes Maß für die Nichtumkehrbarkeit solcher Prozesse ist (siehe Kapitel VII).

Die Zeitlichkeit des natürlichen Geschehens findet demnach im thermodynamischen Zeitpfeil eine gesetzmäßige Begründung. Neben der Zeitlichkeit ist für einen historischen Vorgang aber

auch die Nichtwiederholbarkeit und damit die Einzigartigkeit des Geschehens kennzeichnend. Nun scheint sich aber gerade diese Eigenschaft des Geschichtlichen jeder gesetzmäßigen Erklärung zu entziehen. Denn nach herkömmlicher Vorstellung sind Gesetz und Wiederholbarkeit unauflösbar miteinander verbunden. Zumindest scheint dies die Auffassung in den exakten Wissenschaften zu sein, wo man das reguläre Verhalten von Naturerscheinungen geradezu als Wesensmerkmal eines gesetzmäßigen Zusammenhangs deutet. Aber stimmt das tatsächlich?

Betrachten wir die Physik: Ihr zentrales methodisches Instrument ist bekanntlich das kontrolliert ausgeführte Experiment. Das physikalische Experiment ist aber nicht nur der Inbegriff für die Herstellung reproduzierbarer Naturvorgänge, sondern es ist zugleich ein Modell für die Struktur wissenschaftlicher Erklärungen beziehungsweise Vorhersagen. Und zwar haben solche Erklärungen eine dualistische Grundstruktur. Zum einen enthalten sie Aussagen, die sich auf bestimmte Gesetzmäßigkeiten, wie die Naturgesetze, beziehen. Zum anderen enthalten sie aber auch Aussagen über die besonderen Umstände oder Bedingungen, die dem zu erklärenden Ereignis vorausgegangen sind beziehungsweise vorausgehen. Diese werden auch als „Antezedensbedingungen“ bezeichnet. Unter formalen Gesichtspunkten besteht dann eine wissenschaftliche Erklärung darin, das zu erklärende Ereignis aus den Gesetzesaussagen unter Zuhilfenahme der Antezedensbedingungen logisch abzuleiten (siehe Kapitel IX). Wenn das zu erklärende Ereignis bereits stattgefunden hat, so sprechen wir von einer Erklärung. Wenn dagegen das zu erklärende Ereignis noch in der Zukunft liegt, etwa das Eintreten einer Sonnenfinsternis, so sprechen wir von einer Prognose oder Vorhersage.

Das physikalische Experiment ist nun genau die praktische Umsetzung dieses Erklärungsmodells. Hier wird hier die Materie unter definierte Anfangs- und Randbedingungen gesetzt, um auf diese Weise ein physikalisches Ereignis zu induzieren. Durch Variation der Anfangs- und Randbedingungen wird dann untersucht, ob und in welcher Weise zwischen den induzierten Ereignissen eine Korrelation besteht, die möglicherweise auf die

Existenz eines naturgesetzlichen Zusammenhangs hindeutet. Genau so ist auch Galileo Galilei, der Begründer der modernen experimentellen Methode, vorgegangen. Und zwar verifizierte er seine berühmten Fallgesetze, indem er einen Körper jeweils von unterschiedlichen Ausgangspositionen auf einer schiefen Ebene herunterrollen ließ.

In einem Experiment lassen sich aber nicht nur vermutete Zusammenhänge bestätigen, sondern auch falsche Hypothesen ausschließen. Allerdings ist die bloße Tatsache, dass zwischen den Messergebnissen eines Experiments eine Korrelation besteht, noch kein Beleg für einen gesetzmäßigen Zusammenhang. Vielmehr muss eine solche Korrelation, wie man zu sagen pflegt, auch „reproduzierbar“ sein. Nun weiß natürlich jeder Experimentator, dass in Wahrheit kein Experiment bis in alle Einzelheiten reproduzierbar ist. Schon die Ausgangsbedingungen des Experiments, etwa die Zahlenwerte, die an einem Messgerät eingestellt werden, lassen sich niemals exakt reproduzieren. Vielmehr ist jede Einstellung und Ablesung der Messgrößen mit einem bestimmten, wenn auch noch so kleinen Fehler behaftet. Dies liegt an der schon erwähnten Tatsache, dass jeder Prozess in dieser Welt, mithin auch die Durchführung eines Experiments, seinem Wesen nach ein historischer Prozess ist.

Wenn ein Physiker dennoch behauptet, dass ein experimentelles Ergebnis reproduzierbar sei, so kann er davon nur in dem Sinn sprechen, als sich das Ergebnis innerhalb gewisser, eng gesetzter Schwankungsbreiten reproduzierbar einstellt. Nur für den Fall, dass die innerhalb einer experimentellen Serie ablaufenden Prozesse nicht allzu stark voneinander abweichen, lässt sich von einer Regularität sprechen, welche die Folge eines naturgesetzlichen Verhaltens der Materie ist. Mit anderen Worten: Nur wenn *ähnliche Ursachen* auch *ähnliche Wirkungen* hervorrufen, machen sich kleine Schwankungen in der Reproduktion eines Experiments nicht bemerkbar.

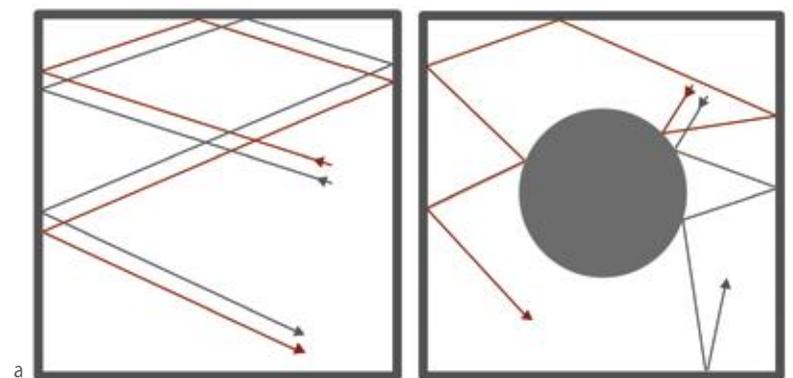
Das Phänomen der Reproduzierbarkeit, das für die exakten Wissenschaften von so grundlegender Bedeutung ist, beruht demnach auf einer bestimmten Form der Kausalität. Allerdings

ist hier zwischen dem Kausalprinzip und dem Kausalgesetz zu unterscheiden. Das Kausalprinzip ist eine physikalische Interpretation des philosophischen Satzes vom zureichenden Grund, demzufolge nichts ohne Ursache geschieht („nihil fit sine causa“). Das Kausalgesetz hingegen führt zu der weitergehenden Aussage, dass *gleiche Ursachen auch gleiche Wirkungen* haben, zwischen den Ereignissen also regelmäßige Zusammenhänge bestehen. Welcher Art diese Zusammenhänge sind, wird dann in Form von generellen Kausalurteilen ausgedrückt, die in den Naturwissenschaften üblicherweise als „Naturgesetze“ bezeichnet werden. Damit sich aber solche Gesetze überhaupt empirisch feststellen lassen, muss das schon erwähnte Ähnlichkeitsprinzip gültig sein, demzufolge nicht nur gleiche Ursachen gleiche Wirkungen, sondern auch noch ähnliche Ursachen ähnliche Wirkungen haben. Nur diese erweiterte Form der Kausalität führt trotz der Geschichtlichkeit jedes realen Vorgangs zu einem (annähernd) reproduzierbaren Verhalten der Materie.

Die Vorstellung von der Reproduzierbarkeit gesetzmäßiger Naturerscheinungen, das dem traditionellen Verständnis des Gesetzesbegriffes zugrunde liegt, ist demnach eine Idealisierung, die nur auf eine bestimmte Klasse von natürlichen Kausalgefügen zutrifft. Es gibt aber auch gesetzmäßige Naturvorgänge, in denen eine andere Form der Kausalität wirksam ist, die sich dadurch auszeichnet, dass hier *ähnliche Ursachen verschiedene Wirkungen* haben.<sup>216</sup>

Systeme, in denen man diese Form der Kausalität antrifft, haben bemerkenswerte Eigenschaften. Und zwar kann sich ihre Dynamik, obwohl sie von deterministischen Gesetzen beherrscht wird, so irregulär und zufällig verhalten, dass man den Eindruck gewinnt, als würde hier das blanke Chaos walten. Mehr noch: Es hat sich herausgestellt, dass es sogar die Gesetze selbst sind, die zu dem chaotischen Verhalten solcher Systeme führen. Wegen ihrer eigentümlichen Dynamik wird diese Erscheinung in der Physik daher auch als „deterministisches Chaos“ bezeichnet.

<sup>216</sup> Auf dieses Phänomen ist bereits Henri Poincaré (1899) bei seinen Untersuchungen zur Himmelsmechanik gestoßen.



**Abb. 37:** In einem System, das von deterministischen Gesetzen beherrscht wird, kann es zwei Formen von Kausalität geben. Die hieraus resultierenden Unterschiede lassen sich anhand der Bewegung eines Teilchens veranschaulichen. In der Physik benutzt man dazu die Darstellung eines Teilchens im sogenannten Phasenraum. Der Phasenraum ist ein mathematischer Raum, der aus den Orts- und Geschwindigkeitskoordinaten eines Teilchens gebildet wird. Jedes Teilchen lässt sich dann durch einen Punkt im Phasenraum repräsentieren, wobei die Bewegung des Teilchens eine Bahn im Phasenraum beschreibt. (a) Ähnliche Ursachen haben ähnliche Wirkungen: Die Bahn im Phasenraum ist stabil. Minimale Änderungen in den Anfangsbedingungen haben auch nur minimale Auswirkungen auf den Endzustand. Die Bahnen im Phasenraum bleiben in enger Nachbarschaft zueinander. Der Zustandsablauf ist reproduzierbar. (b) Ähnliche Ursachen haben verschiedene Wirkungen: Die Bahn im Phasenraum ist instabil. Minimale Änderungen in den Ausgangsbedingungen haben makroskopische Auswirkungen. Die Bahnen im Phasenraum divergieren, so dass selbst für eng benachbarte Anfangszustände die Endzustände im Phasenraum in nicht berechenbarer Weise hin- und herspringen. Der Zustandsablauf ist nicht reproduzierbar. Diese Situation liegt vor, wenn in der Mitte eines Billardtisches ein kugelförmiges Hindernis installiert ist. Man bezeichnet diese Anordnung auch als Sinai-Billard, benannt nach dem Mathematiker Yakov Sinai.

Der eigentliche Grund für das scheinbar regellose und chaotische Verhalten liegt in der nichtlinearen Verknüpfung von Ursache und Wirkung. Mathematisch gesehen lassen sich in solchen nichtlinearen Systemen die einzelnen Wechselwirkungskräfte nicht mehr einfach linear zu einer Gesamtkraft addieren, sondern die Summe aller Kräfte bildet hier eine höherrangige Ordnung. Für solche Systeme ist es kennzeichnend, dass ihre Dynamik extrem empfindlich von den Anfangsbedingungen abhängt (Abbildung 37). Zwar sind auch solche Systeme im Prinzip noch berechenbar, weil sie strikten Gesetzen gehorchen, faktisch sind sie

es jedoch nicht, da sich wegen der Nichtlinearität bereits kleinste Fehler in der Bestimmung der Anfangsbedingungen lawinenartig verstärken. Hierdurch wird wiederum das Zeitfenster, für das sich die Entwicklung des Systems prognostizieren lässt, drastisch verkürzt. Weil aber jede Bestimmung der Anfangsbedingungen zwangsläufig mit einer Unschärfe behaftet ist, lassen sich chaotische Systeme nicht mehr wie die klassischen Systeme der Mechanik langfristig berechnen.

Von ihrer enormen physikalischen Bedeutung einmal abgesehen, stellen die chaotischen Systeme ganz offensichtlich auch ein interessantes Modell für das Phänomen der Geschichtlichkeit dar.<sup>217</sup> Denn die Prozesse, die in solchen Systemen ablaufen, sind weder umkehrbar noch wiederholbar. Sie sind ebenso einzigartig wie alle geschichtlichen Vorgänge. Gleichwohl werden sie von deterministischen Gesetzen beherrscht.

## Die abstrakte Welt der Randbedingungen

Wir wollen die bisher entwickelten Gedanken weiter vertiefen, indem wir jetzt unser Augenmerk auf die Anfangsbedingungen richten, von denen ein physikalischer Prozess seinen Ausgang nimmt. Wie wir gesehen haben, sind die Anfangsbedingungen für die Geschichtlichkeit des Geschehens insofern wichtig, als sich in ihnen der Tatsachengehalt der Welt ausdrückt. Könnte man generell die Geschichte der Anfangsbedingungen zurückverfolgen, sie vielleicht sogar gesetzmäßig erklären, so hätte man bereits ein abstraktes Modell einer historischen Weltbeschreibung.

In der mechanischen Physik spielten solche Überlegungen bisher keine Rolle, weil die Gesetzmäßigkeiten der Mechanik reversibel sind und damit auch keine Richtung der Zeit auszeichnen. Mit anderen Worten: Die Welt hat im mechanistischen Weltbild keine historische Dimension, weil alle Prozesse zeitsymmetrisch und in diesem Sinn „geschichtslos“ sind. Nur deswegen konnte

<sup>217</sup> Küppers (1991).

seinerzeit überhaupt die Idee vom Laplace'schen Dämon aufkommen, der bei genauer Kenntnis des gegenwärtigen Zustandes der Welt mit Hilfe der mechanischen Gesetze gleichermaßen in die Vergangenheit wie die Zukunft sehen kann. Als jedoch die Grenzen der reversiblen Physik sichtbar wurden und die Prinzipien der irreversiblen Physik an Bedeutung gewannen, gerieten auch die Anfangsbedingungen in den Blickpunkt des physikalischen Interesses – so etwa bei dem Versuch, die Irreversibilität des Naturgeschehens aus den mechanischen Gesetzen mit der Annahme exzeptioneller Anfangsbedingungen des Universums zu erklären (siehe Kapitel VII).

Jetzt sehen wir, dass die Anfangsbedingungen unter dem Einfluss nichtlinearer Gesetze sogar zu einer kritischen Größe werden können, weil sich bereits kleinste, zufallsbedingte Störungen und Schwankungen, sogenannte Instabilitäten, unter Umständen lawinenartig verstärken und dem physikalischen Geschehen einen einzigartigen Verlauf geben.

Das kritische Verhalten der Anfangsbedingungen gewinnt vor allem dort an Bedeutung, wo die Dynamik des Systems auf die Anfangsbedingungen selbst zurückwirkt. Ein solcher Fall liegt beispielsweise vor, wenn der Endzustand eines Systems nicht stabil ist, sondern selbst wieder zum Ausgangspunkt einer neuen Entwicklung wird. Die Anfangsbedingungen können hier gleichsam ein Eigenleben entwickeln, weil sie durch die physikalischen Prozesse, die sie auslösen, selbst wieder modifiziert werden. Rückkopplungsmechanismen dieser Art sind zum Beispiel für alle biologischen Verstärkungsprozesse bedeutsam. Sie fallen dort unter den Begriff der „Autokatalyse“, was nichts anderes als Selbstverstärkung heißt. Da sich jedoch in autokatalytischen Systemen der Anfang des Systems in seiner Entwicklungsgeschichte verliert, hat es wenig Sinn, weiterhin von „Anfangsbedingungen“ zu sprechen. Vielmehr haben die Anfangsbedingungen hier den Charakter permanenter „Randbedingungen“, welche die Entwicklung des Systems kanalisieren.<sup>218</sup>

<sup>218</sup> Ebd.