2 Physikalische Realität

Übersicht

2.1 Raum und Zeit 3
2.2 Materie und Energie 8
2.3 Kausalität und Wahrscheinlichkeit 14
2.4 Chaos und Entropie 18

2.1 Raum und Zeit

Die physikalische Realität ist essentiell raumzeitlich. Physikalische Gegenstände befinden sich zu einer Zeit an einem Ort, und physikalische Vorgänge und Ereignisse finden zu einer Zeit an einem Ort statt. Ein Gegenstand, der sich nie irgendwo befindet, ist nicht Teil der physikalischen Realität. Genauso wenig ist ein Vorgang oder Ereignis, das nie irgendwo stattfindet, Teil dieser Realität. Ein Ort ist hier ein abgegrenztes Gebiet im physikalischen Raum, und eine Zeit ist ein abgegrenzter Abschnitt der physikalischen Zeit.

Die Frage, was physikalischer Raum und physikalische Zeit sind und in welchem Sinne diese Objekte existieren, gehört nicht zu den einfachsten Fragen, über die es sich nachzudenken lohnt. Wir erläutern zunächst die Vorstellung der klassischen Physik, die auf Isaac Newton (1643-1727) zurückgeht.[1] Der physikalische Raum und die physikalische Zeit existieren unabhängig von physikalischen Gegenständen, Ereignissen und Prozessen. Sie sind durch innere Eigenschaften bestimmt, die sich nicht auf die Eigenschaften physikalischer Gegenstände, Ereignisse und Prozesse zurückführen lassen. Newton unterstellt einen dreidimensionalen, linearen, nicht gekrümmten und in alle Richtungen unbeschränkten physikalischen Raum. Diese Vorstellung ist an unsere sinnliche Raumanschauung angelehnt und lässt sich mathematisch durch die drei-

[1] Das Hauptwerk Newtons zur Physik ist die *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*; siehe Newton (1988) für eine deutsche Übersetzung.

dimensionale euklidische Geometrie beschreiben. Diese Vorstellung ist immer noch sehr verbreitet. Es ist an dieser Stelle wichtig einzusehen, dass diese Vorstellung nicht notwendig ist: Der physikalische Raum hat möglicherweise eine andere Gestalt, ist gekrümmt, beschränkt oder sogar höherdimensional. Aus dem Raumbegriff erhalten wir logisch-analytisch keine spezifische Gestalt eines Raumes, und unsere sinnliche Anschauung des physikalischen Raumes mag uns täuschen.[2]
Die Zeit ist in der klassischen Physik eindimensional, linear, ungekrümmt und unabhängig vom physikalischen Raum. Fügen wir dem dreidimensionalen euklidischen Raum eine weitere lineare zeitliche Koordinate hinzu, erhalten wir die vierdimensionale Galilei-Raumzeit.[3] Auch diese ist in der klassischen Physik unabhängig von physikalischen Gegenständen, Ereignissen und Prozessen und durch ihre inneren Eigenschaften bestimmt. Wie beim Raum ist auch bei der Raumzeit ein vierdimensionales euklidisches Modell, das keine Krümmung oder Beschränkung beinhaltet, keineswegs notwendig. Der physikalische Raum zu einer Zeit, die Raumzeit als Ganzes und auch die Zeit selbst haben möglicherweise eine andere Gestalt.[4] Die physikalische Raumzeit bleibt hier jedoch immer noch der Hintergrund für physikalische Prozesse und Ereignisse und existiert unabhängig von diesen. Der Raum zu einer Zeit, welche Gestalt er auch immer hat, ist der Hintergrund physikalischer Gegenstände. Man spricht hier vom absoluten Raum bzw. von der absoluten Raumzeit.

Die Vorstellung eines absoluten Raumes und einer absoluten Raumzeit war nie Konsens in der Physik. Manche halten die Vorstellung eines leeren Raumes ohne physikalische Gegenstände für unhaltbar, da der physikalische Raum nichts anderes als eine Abstraktion ist, die wir verwenden, um Anordnungen konkreter physikalischer Gegenstände zu beschreiben. Dies ist die sogenannte relationale Theorie des Raums, die sich schon bei Gottfried Wilhelm Leibniz (1646–1716) findet.[5] Weiterhin wird behauptet, dass es keine Zeit gibt, ohne dass sich irgendwo etwas ändert. Die Zeit soll nichts anderes als ein Maß für zyklische physikalische Veränderungen sein; ohne physikalische Uhren gäbe es also keine physikalische Zeit. Wer diese Kritik einer absoluten Raumzeit teilt, wird Albert Einsteins (1879–1955) Relativitätstheorie, die wir im Folgenden

[2] Immanuel Kant (1724-1804) irrt in seiner *Kritik der reinen Vernunft*. Unsere Anschauungsform von Raum und Zeit ist keineswegs notwendig und allgemein, sie sind vielmehr veränderbar und sehr speziell. Siehe hierzu Kant (1998).
[3] Der Name ehrt die Beiträge von Galileo Galilei (1564-1642) zur Physik.
[4] Die Gestalt eines Raumes wird mathematisch durch dessen Topologie beschrieben; siehe zum Beispiel Laures und Szymik (2015).
[5] Die wesentliche Quelle ist hier die Leibniz–Clarke-Korrespondenz (1715–1716); siehe Leibnitz und Clarke (1990).

skizzieren, schätzen.

Die erste Annahme der speziellen Relativitätstheorie ist, dass zwei relativ zueinander gleichförmig bewegte räumliche Bezugssysteme gleichwertig sind; in ihnen gelten die gleichen physikalischen Gesetze. Es gibt keine absolute Ruhe und in diesem Sinne keinen absoluten Raum. Die zweite Annahme ist die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit. Aus diesen Annahmen erhält man (recht einfach), dass relativ zueinander bewegte Beobachter Längen und Zeiten unterschiedlich messen. Relativ zum Beobachter bewegte Längen sind kürzer; relativ zum Beobachter bewegte Uhren gehen langsamer.[6] Des Weiteren erhält man die berühmte Äquivalenz von Masse und Energie, auf die wir im nächsten Abschnitt näher eingehen. In der speziellen Relativitätstheorie existiert zwar kein absoluter Raum, aber eine absolute Raumzeit, die durch ihre innere Struktur bestimmt ist. Das mathematische Modell dieser Raumzeit ist der vierdimensionale Minkowski-Raum, der durch den Minkowski-Abstand charakterisiert ist. Dieser unterscheidet sich grundlegend vom Abstand im vierdimensionalen Galilei-Raum.[7] Der Raumzeit der speziellen Relativitätstheorie kommt kraft ihrer inneren Eigenschaften eine eigenständige Existenz jenseits der physikalischen Vorgänge zu.
In der allgemeinen Relativitätstheorie geht Einstein einen Schritt weiter: Die Gestalt der Raumzeit wird durch die Dynamik von Materie und Energie bestimmt. Materie und Energie krümmen die physikalische Raumzeit, und diese Krümmung beschreibt die Schwerkraft, welche die Bewegung der Materie bestimmt. Schwerkraft und Beschleunigung sind hierbei lokal physikalisch identisch. Die Feldgleichungen Einsteins beschreiben die Krümmung der physikalischen Raumzeit durch die Dynamik von Materie und Energie quantitativ und bestimmen deren Gestalt.[8] Die physikalische Raumzeit ist damit in der allgemeinen Relativitätstheorie kein absoluter Hintergrund der physikalischen Vorgänge,

[6] Mit etwas linearer Algebra und dem Satz des Pythagoras erhält man die Längenkontraktion $l = l_0\sqrt{1 - v^2/c^2}$ und die Lorentz-Transformationen der Minkowski-Raumzeit; siehe Müller und Frauendiener (2020).

[7] Die Metrik des Minkowski-Raums wird durch

$$ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2 - c^2dt^2$$

bestimmt; siehe Müller und Frauendiener (2020).

[8] Der Formalismus der allgemeinen Relativitätstheorie ist differentialgeometrisch. Die Feldgleichungen bilden ein System von zehn gekoppelten, nichtlinearen partiellen Differentialgleichungen zweiter Ordnung, die kompakt geschrieben die Form

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

haben; siehe Müller und Frauendiener (2020).

sondern wird durch diese bestimmt.

Die wichtigsten Vorhersagen der allgemeinen Relativitätstheorie, die durch Experimente bestätigt wurden, sind die folgenden:

- Die Lichtablenkung durch die Schwerkraft
- Die Existenz von Gravitationslinsen
- Die Abhängigkeit der Zeitmessung von der Schwerkraft
- Die Drehung der elliptischen Umlaufbahn des Merkur um die Sonne und andere astronomische Phänomene
- Die Rotverschiebung der Wellenlänge von Licht aus Gebieten mit hoher Schwerkraft
- Die Existenz schwarzer Löcher
- Die Existenz von Gravitationswellen

Trotz dieser Erfolge gerät Einsteins Theorie in der Kosmologie an ihre Grenzen. Wir haben belastbare Beobachtungen, die zeigen, dass das Universum expandiert und sich diese Expansion beschleunigt. Die Galaxien im Universum fliegen immer schneller auseinander. Die allgemeine Relativitätstheorie in Einsteins ursprünglicher Form erklärt diese Beobachtungen nicht. Das Standardmodell der Kosmologie unterstellt nun die Existenz einer dunklen Energie, die einen negativen Druck besitzt, räumlich abstoßend wirkt und die beschleunigte Expansion des Universums erklärt.[9] Die Annahme dunkler Energie ist rein hypothetisch und sicherlich durch die Absicht motiviert, eine fundamentale Revision der allgemeinen Relativitätstheorie zu vermeiden. Weiterhin scheinen neuere Beobachtungen der Expansion des Universums durch die Annahme dunkler Energie nicht erklärbar zu sein.[10] Es gibt eine Reihe von Ansätzen, wie die Annahme eines unbekannten kosmologischen Feldes, weiterer räumlicher Dimensionen oder die Annahme starker Vakuumfluktuationen, die versuchen, die Expansion des Universums ohne dunkle Energie zu erklären. Diese Ansätze sind aber zur Zeit noch rein spekulativ.

Das zweite Problem der allgemeinen Relativitätstheorie tritt im Zusammenhang mit der Urknalltheorie der zeitgenössischen Kosmologie zutage. Gehen wir in einem expandierenden Universum zeitlich zurück, so werden Energie und Maße räumlich kontrahiert; das Universum wird dichter und heißer. Im Rahmen der allgemeinen Relativitätstheorie existiert unter gewissen Regularitätsannahmen ein Raumzeitpunkt, an dem Dichte, Temperatur und Schwerkraft des Uni-

[9] Als Standardmodell hat sich das ΛCDM-Modell etabliert; siehe Dodelson (2003).
[10] Es gibt Hinweise darauf, dass die Beschleunigung der Expansion des Universums sich verringert bzw. dunkle Energie nicht konstant ist; siehe Son J. et al. (2025).

versums unendlich werden; dies ist der sogenannte Urknall. Es handelt sich hier um ein mathematisches Resultat von Roger Penrose (1931-) und Stephen Hawking (1942-2018), das keine physikalische Realität beschreibt: Die allgemeine Relativitätstheorie verliert in einer Umgebung des vermeintlichen Urknalls ihre Gültigkeit.[11] Es gibt heute eine Vielzahl von Theorien, die versuchen, die Beschaffenheit des Universums bei hoher Energiedichte und Temperatur zu beschreiben und die physikalischen Kräfte zu einer Urkraft zu vereinigen.[12] All diese Theorien sind hypothetisch, nicht durch Experimente belegt und oftmals begrifflich und mathematisch unzureichend entwickelt.

Die Forschung zur physikalischen Raumzeit in der zeitgenössischen Physik erscheint unübersichtlich, in Details verzettelt und im Hinblick auf ihr Ergebnis offen. Es gibt keinen Konsens darüber, welches das beste mathematische Modell der physikalischen Raumzeit ist, und ein solcher Konsens ist nicht in Sicht. Wir können und dürfen damit über das Wesen der physikalischen Raumzeit spekulieren.

Die raumzeitliche Leinwand ist als Ganzes da, auch wenn das kosmische Bild erst zum Teil entstanden ist. Wir nehmen an, dass die physikalische Raumzeit unabhängig von der Dynamik von Masse und Energie, also der Entwicklung des Universums, existiert und eine innere Gestalt und lokale Struktur hat. Diese Gestalt und Struktur kennen wir allerdings auf raumzeitlich großen und kleinen Skalen noch nicht.[13] Dabei bestreiten wir selbstverständlich nicht, dass Masse und Energie diese Raumzeit zusätzlich krümmen; Materie und Energie bestimmen die Raumzeit jedoch nicht essentiell. Die Farbe des kosmischen Bildes verändert die Beschaffenheit der Leinwand nur oberflächlich. Die Expansion des Universums, die wir beobachten, lässt sich nicht ausschließlich auf die Materie und Energie im Universum zurückführen; sie ist vielmehr eine Konsequenz der inneren Gestalt der Raumzeit auf großen Skalen. Sollte dies richtig sein, wird die Annahme dunkler Energie oder eines weiteren kosmologischen Feldes unnötig. Bei einer überzeugenden Beschreibung des stark verdichteten Universums wird vermutlich die lokale Struktur der Raumzeit, die wir noch nicht verstehen, re-

[11] Siehe hierzu Hawking and Penrose (1970).

[12] Beispiele sind die Stringtheorie, die Schleifenquantengravitation, die Twistor-Theorie und viele weitere.

[13] Wir befürchten, dass ein differentialgeometrisches Modell die physikalische Raumzeit nur approximativ beschreiben kann, da es (zu) starke Anforderungen an die Stetigkeit und Glattheit der Raumzeit stellt. Ein mathematisches Modell der Raumzeit wird sicher einen messbaren Raum zugrunde legen; welche zusätzlichen topologischen und insbesondere differentialtopologischen Strukturen wir annehmen dürfen, scheint uns nicht geklärt. Die Einsteinschen Feldgleichungen sollten in partielle stochastische Differentialgleichungen übergehen.

levant sein. Vielleicht wird unter Berücksichtigung der inneren Struktur der Raumzeit auch eine Aufklärung des Mysteriums des Urknalls möglich.

Bei vielen Physikern wird unsere Perspektive auf die Raumzeit keinen großen Anklang finden. Sie erfordert eine grundlegende Revision der allgemeinen Relativitätstheorie und kehrt zu der Annahme einer in gewissem Sinne absoluten Raumzeit zurück. Unsere Perspektive hat allerdings einen großen philosophischen Vorteil: Sie erlaubt die Bestimmung der physikalischen Realität als raumzeitliche Realität, die wir zu Beginn dieses Abschnitts geben. Mit dieser Bestimmung können wir die Möglichkeit ernst nehmen, dass es Teile der physikalischen Realität gibt, die den Methoden physikalischer Forschung nicht zugänglich sind. Eine erkenntnistheoretische Definition der physikalischen Realität als etwas, das Beobachtungen, Experimenten und mathematischer Modellbildung zugänglich ist, erscheint unrealistisch. Ein Realist in Bezug auf die physikalische Realität wird das, was physikalisch der Fall ist, nicht davon abhängig machen wollen, was wir erkennen oder verstehen können.

2.2 Materie und Energie

Das klassische Bild der physikalischen Realität beinhaltet materielle Teilchen wie Elektronen, Protonen und Neutronen, die Masse besitzen und ein räumliches Gebiet einnehmen. Die zeitliche Dynamik dieser Teilchen wird durch vier physikalische Grundkräfte bestimmt. Neben der Schwerkraft kennen wir die elektromagnetische Kraft sowie die starke und schwache Kernkraft. Die elektromagnetische wirkt zwischen elektrisch geladenen Teilchen wie Protonen und Elektronen und hält Atome und Moleküle zusammen.

Die starke Kernkraft wirkt auf kurze Distanz und hält Protonen und Neutronen im Atomkern zusammen. Zuletzt ist die schwache Kernkraft für den radioaktiven Zerfall verantwortlich und hat nur eine sehr geringe Reichweite. Eine materialistische Philosophie versteht materielle Teilchen als die einzige Substanz der Realität, die in der zeitlichen Dynamik der Welt unverändert bleibt. Die materielle Substanz ist der Träger von Eigenschaften; dabei ändern sich innere Eigenschaften der Substanz nicht, während sich relationale Eigenschaften der Substanz mit der Zeit ändern können.

Die hier beschriebene Vorstellung der Realität als Ganzes und insbesondere der physikalischen Realität ist sehr verbreitet; sie beeinflusst immer noch den Unterricht an deutschen Schulen. Wir skizzieren in diesem Abschnitt eine andere Vorstellung der physikalischen Realität, die versucht, zumindest in Grundzügen der physikalischen Forschung gerecht zu werden. Wir werden sehen, dass es

keine materielle Substanz gibt, die in der Dynamik der physikalischen Realität erhalten bleibt. Materie kann in Strahlung übergehen; die Energie besitzt jedoch keine Ruhemasse und kann nicht als Substanz verstanden werden. Die Elementarteilchen der Physik sind nur unscharf räumlich abgegrenzte Prozesse, die Wahrscheinlichkeiten für Ereignisse, insbesondere für Messungen, bestimmen. Die vier physikalischen Kräfte sind Wechselwirkungen solcher Prozesse und selbst wieder dynamische Vorgänge, die als Austausch von Elementarteilchen beschrieben werden können. Diese Vorstellung wird im philosophischen Jargon Prozessontologie der physikalischen Realität genannt. Physikalische Prozesse sind fundamentaler als statische Dinge wie materielle Teilchen. Diese Idee findet sich schon bei dem vorsokratischen Philosophen Heraklit von Ephesos (520-460 v. Chr.), dem das Bonmot *Die einzige Konstante im Universum ist die Veränderung* und der Satz *Alles fließt* zugeschrieben werden.[14]

Wir entwickeln nun einige Details unserer Vorstellung. Einsteins berühmte Formel $E = mc^2$ behauptet die Äquivalenz von Masse und Energie mit einem großen konstanten Proportionalitätsfaktor c^2. Wir beschreiben zwei physikalische Vorgänge, bei denen Materie in Strahlungsenergie übergeht.

Bei der Kernfusion in Sternen werden bei hohem Druck und hoher Temperatur Wasserstoffkerne zu Heliumkernen verschmolzen. Die Masse des Endprodukts ist dabei etwas kleiner als die der Ausgangsstoffe und wird als energiereiche Gammastrahlung freigesetzt. Gammastrahlung besteht aus Photonen, die keine Ruhemasse haben und in diesem Sinne reine Energie sind. Die Gammastrahlung wandelt sich auf dem Weg zur Oberfläche eines Sterns in andere Formen elektromagnetischer Strahlung und wird an der Oberfläche vorwiegend als Licht- und Wärmestrahlung abgegeben.[15] Dieser physikalische Vorgang ist für uns von Bedeutung: In einem sehr kalten und dunklen Universum ist die Entstehung von Leben, wie wir es auf der Erde kennen, kaum vorstellbar.

Ein zweiter Vorgang wird langfristig für die Entwicklung des Universums von größerer Bedeutung sein. Sterne hinreichend großer Masse kollabieren zu schwarzen Löchern, wenn ihr Brennstoff verbraucht ist und die Schwerkraft größer als der Strahlungsdruck wird. In einem schwarzen Loch wird Materie auf ein kleines Volumen verdichtet; die Schwerkraft ist dann so stark, dass Licht aus einem Gebiet um das schwarze Loch nicht entweichen kann. Schwarze Löcher können weitere Materie wie Staub und Gas, die Überreste von Sternen und sogar andere schwarze Löcher verschlingen und damit wachsen. Folgen wir Stephen Hawking (1942-2018), gibt es allerdings auch eine schwache Wärmestrahlung schwarzer

[14] Siehe hierzu Gemelli (2010).
[15] Siehe Shapiro (1997) zur Kernfusion.

Löcher, durch die diese Masse verlieren und langfristig verdampfen, wenn sie keine Materie aus ihrem Umfeld mehr aufnehmen. Die Existenz schwarzer Löcher ist heute durch indirekte, aber auch durch direkte Beobachtungen gesichert. Die Hawking-Strahlung ist so schwach, dass sie noch nicht direkt nachgewiesen werden konnte.[16] Da ihre theoretische Herleitung überzeugend ist, wird ihre Existenz heute von den meisten Physikern akzeptiert. Wir haben damit einen physikalischen Mechanismus, durch den im Grunde jegliche Materie in Strahlungsenergie ohne Ruhemasse übergehen kann.

Der Physik-Nobelpreisträger Roger Penrose (1931-) nimmt sogar an, dass alle Materie im Universum tatsächlich in Strahlung übergehen wird, wobei er neben der Verdampfung schwarzer Löcher auch den Zerfall von Elektronen und Protonen unterstellt. Dies ist eine Grundlage seiner konformen zyklischen Kosmologie, die den Übergang aller Materie in Strahlung als das Ende eines Äons des Universums und als den Urknall des nächsten Äons des Universums sieht.[17] Der Zerfall von Elektronen und Protonen ist eine Mutmaßung, die nicht durch Beobachtungen gestützt ist und von vielen Physikern abgelehnt wird.

Es ist zwar denkbar, dass die Entwicklung des Universums seit dem vermeintlichen Urknall erst an ihrem Anfang steht und der Zerfall von Elektronen und Protonen sehr lange Zeiträume benötigt; sicher ist dies nicht.[18] Wie dem auch sei, wir können sicher sein, dass Materie mit Ruhemasse in der zeitlichen Dynamik der physikalischen Realität nicht erhalten bleibt und in diesem Sinne keine materielle Substanz der physikalischen Realität darstellt. Eine der grundlegenden Annahmen der zeitgenössischen Physik ist nicht die Erhaltung der Materie, sondern die Erhaltung der Energie. Energie in konzentrierter Form als Materie oder als Strahlung kann aber nicht als Substanz im Sinne der klassischen materialistischen Metaphysik verstanden werden. Sie ist vielmehr wesentlich dynamisch und nicht in geeigneter Weise lokalisiert.

Kommen wir nun vom Großen zum Kleinen. Um unsere Vorstellung der physikalischen Realität zu präzisieren, stellen wir einige Elemente der zeitgenössischen Elementarteilchenphysik vor. Wir wissen heute, dass Protonen und Neutronen im Kern der Atome nicht elementar sind. Die innere Dynamik von Protonen und Neutronen wird durch Quarks bestimmt, die durch die starke Kernkraft zusammengehalten werden. Neben sechs Quarks kennen wir sechs Leptonen, zu denen das Elektron gehört. Diese unterliegen der schwachen, aber nicht der

[16] Siehe Hawking (1975).

[17] Das Buch Penrose (2013) hierzu ist lesenswert, allerdings in weiten Teilen rein spekulativ.

[18] Es gibt Experimente, die den Zerfall von Protonen nachweisen wollen, diese sind bisher jedoch nicht erfolgreich; siehe Navas te al. Navas (2024).

starken Kernkraft. Alle geladenen Teilchen wie das Elektron unterliegen weiterhin der elektromagnetischen Wechselwirkung. Hinzu kommen die Antiteilchen zu geladenen Teilchen mit entgegengesetzter Ladung, aber gleicher Masse, wie zum Beispiel das Positron als Antiteilchen des Elektrons. All diese Elementarteilchen haben eine Ruhemasse, die heute durch eine Wechselwirkung mit dem Higgs-Feld erklärt wird. Die elektromagnetische Wechselwirkung wird durch das masselose Photon vermittelt, und die starke Wechselwirkung von Quarks wird durch Gluonen vermittelt. Daneben haben wir noch die massereichen Bosonen, die die schwache Kernkraft vermitteln. Hypothetisch ist die Annahme von Gravitonen, die die Schwerkraft vermitteln sollen. Dies ist eine Vielfalt von Elementarteilchen, die trotzdem Gemeinsamkeiten in ihrer zeitgenössischen physikalischen Beschreibung haben.[19]

Elementarteilchen werden in der Quantenphysik in nichtrelativistische Näherungen durch Lösungen der Schrödingergleichung modelliert. Bei diesen Lösungen handelt es sich um zeitabhängige Wellenfunktionen.[20] Ist die Wellenfunktion eines Teilchens zu allen Zeitpunkten identisch, so ist das Teilchen in einem stationären Zustand. Die Wellenfunktion beschreibt einen physikalischen Prozess, der die Wahrscheinlichkeit für bestimmte Ereignisse bestimmt. Man berechnet aus der Wellenfunktion eines Teilchens zu einem Zeitpunkt die Wahrscheinlichkeit, dass eine Messung das Teilchen zu diesem Zeitpunkt in einem gegebenen räumlichen Gebiet verortet.[21] Für Teilchen in einem stationären Zustand ist diese Wahrscheinlichkeit zu jedem Zeitpunkt gleich. Wird eine Messung durchgeführt, so spricht man vom Kollaps der Wellenfunktion, der dazu führt, dass wir bestimmte Messwerte erhalten. Der Vorgang im Messgerät ist gemäß der klassischen Kopenhagener Deutung nicht physikalisch determiniert; verschiedene Messvorgänge sind möglich, nur die Wahrscheinlichkeit für diese Messvorgänge ist bestimmt.[22] Wir kommen im nächsten Abschnitt hierauf

[19] Siehe Berkeley (2004) zum Standardmodell der Elementarteilchenphysik.

[20] Diese Gleichung wurde von dem Pionier der Quantenphysik Erwin Schrödinger (1887-1961) eingeführt und hat die Form

$$\mathrm{i}\hbar\frac{\partial\psi(x,t)}{\partial t} = \hat{H}\psi(x,t)$$

Dabei ist i die imaginäre Einheit, $\hbar$ das reduzierte Plancksche Wirkungsquantum und $\hat{H}$ der Hamiltonoperator, der auf die Wellenfunktion $\psi(x,t)$ wirkt. Es handelt sich um einen Hilbertraumformalismus, d. h. ψ gehört zum Raum quadratintegrierbarer Funktionen. Siehe hierzu Hall (2013).

[21] Nach der Bornschen Regel ist räumliche Dichte für diese Wahrscheinlichkeit $|\psi(x,t)|^2$.

[22] Es gibt deterministische Interpretationen der Quantenmechanik wie die Viele Welten-Theorie oder die De-Broglie-Bohm-Theorie. Diese erscheinen uns jedoch so bizarr, dass wir auf eine Diskussion verzichten. Hier ist schon genug Papier verschwendet worden.

zurück. Mit Sicherheit sind Elementarteilchen, durch die Wellenfunktion als physikalischer Prozess unabhängig von Beobachtungen beschrieben, Teil der physikalischen Realität. Wenn wir uns sicher sind, dass die Erde um die Sonne kreist, auch wenn kein beobachtendes Bewusstsein vorhanden ist, können wir uns genauso sicher sein, dass Elementarteilchen physikalische Vorgänge unabhängig von Beobachtungen sind, die Wahrscheinlichkeiten für Beobachtungen bestimmen. Von der Vorstellung eines Teilchens als Materie bzw. Energie, die sich an einem eindeutig bestimmten Ort befindet, müssen wir allerdings Abstand nehmen. Es gibt keine Grenze, jenseits derer die Wahrscheinlichkeit der Verortung eines Elementarteilchens null wird. Die Dichtefunktion der Wahrscheinlichkeit, gegeben durch die Wellenfunktion eines Elementarteilchens, ist nur für bestimmte räumliche Koordinaten maximal und für andere Koordinaten verschwindend gering. Selbst stationäre Elementarteilchen sind also weder statisch noch eindeutig räumlich verortet. Sie bilden keine materielle Substanz; es handelt sich vielmehr um Vorgänge, denen Bündel von physikalischen Eigenschaften zugesprochen werden können und die insbesondere Wahrscheinlichkeiten für Ereignisse wie Messungen bestimmen.

Kommen wir nun zu den Wechselwirkungen zwischen Teilchen und Teilsystemen. In der klassischen Physik ist die elektromagnetische Wechselwirkung zwischen geladenen Teilchen durch ein kontinuierliches Kraftfeld gegeben. Es hat sich jedoch gezeigt, dass die Energie dieses Feldes in kleinen Portionen, den sogenannten Feldquanten, auftritt. Die Quantenelektrodynamik wird dem gerecht, indem sie die elektromagnetische Wechselwirkung als Austausch von Lichtquanten (Photonen) zwischen den beteiligten Teilchen bzw. Teilsystemen beschreibt. Ähnlich wird die starke Kernkraft in der Quantenchromodynamik als Austausch von Gluonen zwischen Quarks beschrieben. Die Austauschteilchen der schwachen Kernkraft zwischen Quarks und Leptonen sind massereiche Bosonen. Zuletzt wird auch die Ruhemasse von Teilchen dynamisiert; sie wird durch eine Wechselwirkung mit dem massereichen Higgs-Boson erklärt.

Die Kraftfelder in der zeitgenössischen Quantentheorie sind also nicht statisch, sondern dynamische Vorgänge, die durch Austauschteilchen vermittelt werden. Weiterhin entstehen und vergehen Teilchen gemäß den zeitgenössischen Quantenfeldtheorien in diesen dynamischen Vorgängen. Dies steht im Widerspruch zu einer klassischen materialistischen Interpretation von Teilchen als Substanz der physikalischen Realität, ist aber ganz im Sinne Heraklits, für den das Universum *ein ewig lebendiges Feuer, nach Maßen erglimmend und nach*

Maßen erlöschend war.[23]

In jedem Fall sollten wir die quantendynamische Vorstellung der physikalischen Realität ernst nehmen, da die Quantentheorie präzise Vorhersagen liefert und zumindest in dieser Hinsicht die am besten durch Experimente bestätigte wissenschaftliche Theorie überhaupt ist. Wir neigen aus diesem Grund zu einem Quantenrealismus. Beispiele korrekter Prognosen der Quantenphysik sind:

- Energieniveaus von Atomen (Spektrallinien)
- Magnetisches Moment des Elektrons
- Existenz der Antimaterie
- Supraleitung
- Suprafluidität
- Bose-Einstein-Kondensate
- Quantentunneleffekt
- Quantenverschränkung von Teilchen

Bei der Beschreibung der Schwerkraft gerät die Quantenphysik allerdings an ihre Grenzen. Eine aussagekräftige Quantenfeldtheorie der Schwerkraft, die die Gravitation als Austausch von Teilchen (Gravitonen) beschreibt, ist nicht in Sicht. Ansätze wie die Stringtheorie oder die Schleifenquantengravitation sind konzeptionell unzureichend ausgearbeitet und haben bisher keine prognostische Kraft. Wir vermuten, dass die Raumzeit auf kleinen Skalen jenseits quantenphysikalischer Prozesse eine eigene noch unbekannte Struktur besitzt, die bei einer umfassenden physikalischen Theorie aller Wechselwirkungen berücksichtigt werden muss. Selbstverständlich ist diese Vermutung, wie so vieles in der zeitgenössischen Physik, rein spekulativ.

Wir haben in diesem Abschnitt gesehen, dass die zeitgenössische Physik zeigt, dass die physikalische Realität keine Welt zeitlosen materiellen Seins, sondern eine Welt energetischen, dynamischen Werdens ist. Die klassische materialistische Metaphysik sollte durch eine Metaphysik ersetzt werden, die raumzeitliche Vorgänge als die fundamentalen Bestandteile der physikalischen Realität versteht.

[23] Siehe Gemelli (2010)

2.3 Kausalität und Wahrscheinlichkeit

Die Vorgänge in der physikalischen Realität scheinen nicht unabhängig voneinander zu sein; vielmehr unterstellen wir ein komplexes Netz von Abhängigkeiten physikalischer Vorgänge. Der Begriff der Kausalität, d. h. die Rede von Ursache und Wirkung, dient der Beschreibung solcher Abhängigkeiten. Die klassische Metaphysik erläutert Kausalität in Bezug auf physikalische Vorgänge wie folgt: Ein physikalischer Vorgang oder eine Menge von physikalischen Vorgängen A ist eine physikalische Ursache für einen physikalischen Vorgang B, wenn A hinreichend dafür ist, dass B in zeitlicher Folge von A in der physikalischen Realität stattfindet. Die Wirkung B folgt also notwendig, wenn A stattfindet. Ein physikalischer Vorgang B wird physikalisch determiniert genannt, wenn eine physikalische Ursache A für B existiert. Der Determinismus in Bezug auf die physikalische Realität behauptet, dass es für jeden Vorgang B, der in der physikalischen Realität stattfindet, eine physikalische Ursache gibt, also einen oder mehrere Vorgänge A, deren Wirkung B ist.

Dieser Kausalitätsbegriff ist in vieler Hinsicht problematisch. Verursachung ist keine logische Beziehung. Wenn der Vorgang A die Ursache für den Vorgang B ist, heißt dies nicht, dass die logische Implikation A *findet statt* $\Rightarrow$ B *findet statt* gilt. Es folgt kein logischer Widerspruch daraus, dass ein Vorgang stattfindet, ein anderer aber nicht. Es ist damit unklar, was in obiger Begriffsbestimmung überhaupt mit hinreichend und notwendig gemeint ist. Weiterhin beobachten wir Verursachung im Sinne einer notwendigen Verbindung von Vorgängen nicht. Wir beobachten nur einzelne Vorgänge und deren Abfolge. Dies ist bereits dem schottischen Philosophen David Hume (1711-1776) aufgefallen. Er schlägt daher eine Regularitätstheorie der Kausalität vor: A ist eine Ursache für B, wenn wir regelmäßig beobachten, dass B auf A folgt und eine zeitliche und räumliche Nähe zwischen den Vorgängen besteht. Es ist nur unsere Gewohnheit, die uns dazu bringt, nach dem Auftreten eines Vorgangs A den Vorgang B zu erwarten; eine kausale Notwendigkeit besteht nicht. Auch diese Sichtweise ist problematisch. Sie erlaubt keine Unterscheidung von Korrelationen mit und Korrelationen ohne Kausalität. Es gibt jedoch zahlreiche korrelierte physikalische Vorgänge, bei denen wir keine Kausalität unterstellen wollen. Zum Beispiel ist die Expansion des Universums mit einer Erhöhung der Gesamtentropie des Universums korreliert; trotzdem führt die Expansion des Raumes selbst nicht zu dieser Entropieerhöhung. Weiterhin macht Humes Konzeption Kausalität zu einer subjektiven Angelegenheit unserer Gewohnheiten; dabei geht es bei Kausalität aber um objektive Zusammenhänge physikalischer Prozesse.

Es gibt viele Ansätze, mit dem Problem der Kausalität umzugehen.[24] Die meisten dieser Ansätze sind allerdings anti-realistisch oder deterministisch und damit für uns nicht akzeptabel. Wir erwarten von einem Kausalitätsbegriff, dass er Sachverhalte in der physikalischen Realität unabhängig von unseren Beobachtungen, Modellen und Theorien benennt und der fundamentalen Unbestimmtheit der Entwicklung der physikalischen Realität gerecht wird. Dass ein kausaler Determinismus immer noch diskutiert und vertreten wird, ist befremdlich. Der Stand physikalischer Forschung und Modellbildung ist seit beinahe 100 Jahren, dass nicht jeder physikalische Vorgang determiniert ist. Betrachten wir zum Beispiel ein radioaktives Isotop, so tritt der Zerfallsprozess spontan unabhängig von allen anderen physikalischen Prozessen ein. Der radioaktive Zerfall wird insbesondere benutzt, um Zufallszahlen zu generieren.[25] Wird ein Photon auf einen halbdurchlässigen Spiegel geschossen und gemessen ob es reflektiert wird oder hindurchfliegt erhalten wir auch ein rein zufälliges Ergebnis. Wie schon im letzten Abschnitt gesagt, bestimmen quantenphysikalische Vorgänge nur die Wahrscheinlichkeit für Messvorgänge; sie legen nicht fest, welcher Messvorgang stattfindet. Dies erlaubt die Bestimmung von Zufallsfolgen. Soweit sprechen wir von nicht determinierten physikalischen Vorgängen auf kleinen räumlichen Skalen; unbestimmte makroskopische physikalische Vorgänge werden uns im nächsten Abschnitt beschäftigen.

Wir führen nun unsere wahrscheinlichkeitstheoretische Konzeption der Kausalität ein und interpretieren diese realistisch.[26] Ein physikalischer Vorgang A ist eine physikalische Ursache eines physikalischen Vorgangs B, wenn die Wahrscheinlichkeit, dass B stattfindet unter der Voraussetzung, dass A stattfindet, größer ist als die Wahrscheinlichkeit, dass B stattfindet unter der Voraussetzung, dass A nicht stattfindet. Sind beide bedingten Wahrscheinlichkeiten gleich, so ist A kausal irrelevant für B; ist die erste bedingte Wahrscheinlichkeit kleiner als die zweite, so ist A ein hemmender kausaler Faktor für B. Ist nun A eine Ursache für B mit bedingter Wahrscheinlichkeit von B unter A gleich eins, so bedeutet dies, dass B sicher stattfindet, wenn A stattfindet; A determiniert B. Ist A kausal relevant für B mit bedingter Wahrscheinlichkeit von B unter A gleich null, so bedeutet dies, dass B nicht stattfindet, wenn A stattfindet; A verhindert B. Zuletzt nennen wir einen physikalischen Vorgang physikalisch

[24] Beispiele sind der nomologische Ansatz von Immanuel Kant (1724-1804) und seinen Epigonen, der kontrafaktische Ansatz von David Lewis (1941-2001) oder die interventionistische Theorie von Georg Henrik von Wright (1916-2003).

[25] Siehe hierzu Stolz (2005)

[26] Die probabilistische Konzeption der Kausalität geht auf Suppes (1970) zurück. Unser Ansatz unterscheidet sich im Hinblick auf die Interpretation der Wahrscheinlichkeit erheblich von dieser Konzeption.

determiniert, wenn physikalische Ursachen existieren, die den Vorgang determinieren. Wie wir oben bereits gesehen haben, sind nicht alle physikalischen Vorgänge physikalisch determiniert.

Der Begriff der Wahrscheinlichkeit, den wir in diesen Definitionen verwenden, verlangt nach Erläuterung. Aus Sicht der Mathematik handelt es sich bei einer Wahrscheinlichkeit um eine Funktion mit bestimmten Eigenschaften auf einer speziellen Art von Mengensystem.[27] Für sich genommen handelt es sich um einen abstrakten Gegenstand, und solche Gegenstände finden sich nicht in der physikalischen Realität; wir kommen hierauf in Abschnitt 5.1 und Kapitel 7 zurück. Wir verwenden den Begriff der Wahrscheinlichkeit hier, um Zusammenhänge zwischen Vorgängen in der physikalischen Realität zu modellieren. Dabei unterstellen wir, dass es in der physikalischen Realität eine Neigung oder Tendenz dafür gibt, dass ein Vorgang eintritt. Die Stärke dieser Neigung oder Tendenz ist dabei oftmals von anderen Vorgängen abhängig, und eben diese Abhängigkeit beschreibt unsere wahrscheinlichkeitstheoretische Konzeption der Kausalität. Philosophisch kann man die Eigenschaft eines verursachenden Vorgang als Dispositionen, d.h. inhärente Potenziale analysieren. Eine geringe Wahrscheinlichkeit nahe null bedeutet eine geringe Neigung, eine hohe Wahrscheinlichkeit nahe eins eine starke Neigung. Wir verstehen diese Neigungen als Relationen zwischen Vorgängen in der physikalischen Realität, unabhängig von Beobachtungen. Die Beobachtung von Korrelationen, d. h. mathematischen Regelmäßigkeiten zwischen Vorgängen, allein reicht nicht aus, um die Behauptung eines kausalen Zusammenhangs in unserem Sinne zu rechtfertigen. Noch wichtiger ist, dass kausale Zusammenhänge zwischen physikalischen Vorgängen bestehen mögen, die wir nicht direkt durch Korrelationen von Beobachtungen belegen können, da sie selten oder sogar einmalig sind. Um eine physikalische Kausalbehauptung zu rechtfertigen, benötigen wir eine physikalische Theorie, die begrifflich-konzeptionell ausgearbeitet ist und prognostische Kraft besitzt. Das heißt zum einen, dass die Theorie Zusammenhänge zur Sprache bringt und verständlich macht, und zum anderen, dass sie korrekte Voraussagen beobachtbarer Korrelationen zwischen physikalischen Vorgängen liefert. Sollte eine Theorie auch nur in einem Fall falsche Vorhersagen machen, müssen wir sie revidieren; sollte es ihr an Erklärungskraft mangeln, muss sie präzisiert oder erweitert werden. Die Rechtfertigung von Kausalaussagen ist damit abhängig von Theorie und Beobachtung; der Gegenstand dieser Aussagen findet sich aber

[27] Mathematisch wird eine Wahrscheinlichkeit P auf einer σ-Algebra definiert. Die Funktion P muss hierbei auf 1 normiert, nichtnegativ und σ-additiv sein. Diese axiomatische Definition geht auf Andrei Kolmogorov (1903-1987) zurück; siehe Kolmogrow (1973). Die bedingte Wahrscheinlichkeit von B unter A ist in diesem Formalismus $P(B|A) = P(A \cap B)/P(A)$.

auch in der unbeobachteten physikalischen Realität. Die Quantenphysik, mit der wir den physikalischen Determinismus zurückweisen, erfüllt die Bedingung der prognostischen Kraft; ihr Erklärungspotential scheint uns jedoch noch nicht vollständig entwickelt zu sein. Wir überlassen dieses Problem gerne Spezialisten.

Bisher haben wir den Zusammenhang von Kausalität und Zeit vernachlässigt. Es ist naheliegend anzunehmen, dass die Ursache zeitlich vor der Wirkung liegt. Wenn ein physikalischer Vorgang A Ursache eines physikalischen Vorgangs B ist, sollte der Vorgang A in einem Zeitintervall beginnen, das vor dem Zeitintervall liegt, in dem B beginnt. Wir schließen damit nicht aus, dass Vorgänge in einem Zeitintervall beide stattfinden; nur die Zeitintervalle, in denen der Beginn der Vorgänge verortet ist, sollten zeitlich geordnet werden. Das Problem ist hier, wie eine zeitliche Vorher-/Nachher-Relation physikalisch beschrieben werden kann. Viele Physiker und Philosophen der Physik gehen davon aus, dass die Naturgesetze zeitlich symmetrisch sind und die Zeit keine Richtung besitzt.[28] Wir können diesen Einlassungen nicht zustimmen. Ein realistisches mathematisches Modell der Raumzeit beinhaltet eine antisymmetrische zeitliche Ordnungsrelation.[29] Diese erlaubt die Interpretation der Relation: b liegt in der Vergangenheit von a und a liegt in der Zukunft von b. Diese Interpretation des mathematischen Modells beschreibt die Richtung der Zeit von der Vergangenheit zur Zukunft. Wir gehen hierbei nicht davon aus, dass die Ordnung total ist. Nur für Vorgänge A und B, deren Beginn entsprechend der zeitlichen Relation geordnet sind, lässt sich Kausalität definieren. Der Beginn des verursachenden Vorgangs liegt entsprechend der Ordnungsrelation vor dem Beginn des verursachten Vorgangs. Der Verzicht auf die Annahme einer Ordnung und Richtung der physikalischen Zeit hat schon zu erheblichen Verwirrungen, wie etwa Zeitreise-Paradoxien, geführt.

Viele Physiker glauben heute, ohne den Begriff der Kausalität auskommen zu können, und die zeitgenössische Physik scheint dieses Konzept tatsächlich weitgehend zu umgehen. Für uns ist der Begriff der Kausalität trotzdem von Bedeutung, da er uns erlaubt, stochastische Gesetzmäßigkeiten zwischen physikalischen Vorgängen zu benennen und realistisch zu interpretieren. Der wichtigste Punkt für uns ist, dass eine deterministische Beschreibung der physikalischen

[28] Der berühmte Aufsatz *On the Notion of Cause* von Bertrand Russell (1872-1970) ist hierfür wegweisend; siehe Russell (1912).

[29] Formal handelt es sich bei einer Ordnung $\preceq$ um eine Relation, die folgende Bedingungen erfüllt: (1) Reflexivität: $a \preceq a$, (2) Antisymmetrie: $a \preceq b$ und $b \preceq a$ impliziert $a = b$, (3) Transitivität: $a \preceq b$ und $b \preceq c$ impliziert $a \preceq c$. Diese erlaubt die Definition einer strengen Ordnung $\prec$ durch $a \prec b$ genau dann, wenn $a \preceq b$ und $a \neq b$. Wir nehmen nicht an, dass diese Ordnung total ist, d. h. dass sich alle Raumzeitpunkte durch Ordnung vergleichen lassen.

Realität offenbar unzureichend ist, wir aber trotzdem einen wahrscheinlichkeitstheoretischen Zusammenhang physikalischer Vorgänge beschreiben können.

2.4 Chaos und Entropie

Die mathematische Theorie dynamischer Systeme beschreibt Entwicklungen von Systemen mithilfe der Iteration von Funktionen oder Flüssen auf dem Raum der Zustände des Systems.[30] Sie wird dazu verwendet, physikalische Vorgänge zu modellieren. Dabei sind diese dynamischen Modelle für sich genommen rein deterministisch; der Zustand des Systems legt alle weiteren Zustände des Systems eindeutig fest. Im Falle von umkehrbaren Systemen sind sogar alle vorhergehenden Zustände des Systems eindeutig bestimmt. Trotz der rein deterministischen Modellierung physikalischer Vorgänge ist die Theorie dynamischer Systeme für uns von Interesse, da solche Systeme eine chaotische Dynamik aufweisen können. Die gängigste Definition einer chaotischen Dynamik stammt von Devaney (1948-2025) und fordert insbesondere, dass ein chaotisches System sensitiv ist.[31] Die Dynamik eines Systems ist sensitiv, wenn beliebig kleine Abweichungen des Zustands des Systems zu einem Zeitpunkt eine völlig andere Dynamik in der zeitlichen Entwicklung des Systems erzeugen.[32]

Es gibt zahlreiche physikalische Systeme mit mathematischen Modellen, bei denen wir entweder eine chaotische Dynamik rigoros nachweisen können oder überzeugende numerische Indizien für eine solche Dynamik haben. Beispiele solcher Systeme sind:

- ein Ball, der auf einer vibrierenden Platte hüpft, und andere gekoppelte mechanische Oszillatoren
- Phasenregelkreise in der Elektronik
- die Wirkung interagierender Gene in Zellen

[30] Wir empfehlen unser Buch Neunhäuserer (2026) als Einführung in die Theorie dynamischer Systeme. Alle Systeme, die wir in diesem Abschnitt erwähnen, werden in unserem Buch mathematisch analysiert.

[31] Ein dynamisches System ist Devaney-chaotisch, wenn das System sensitiv ist, periodische Orbits im Zustandsraum dicht liegen und einzelne dichte Orbits im Zustandsraum existieren, siehe Devaney (1989). Systeme mit diesen Eigenschaften hatte bereits Steven Smale (1930-) untersucht. Die erste mathematische Definition einer chaotischen Dynamik stammt aus Li und York (1977). Li-Yorke-Chaos ist im Allgemeinen etwas schwächer als Devaney-Chaos, in vielen Fällen aber äquivalent.

[32] Ein dynamisches System (X, T) ist sensitiv genau dann, wenn es eine Konstante $c > 0$ gibt, sodass es für alle $x \in X$ und jede offene Umgebung U von x ein $y \in U$ und ein $n \geq 1$ gibt, sodass $d(T^n(x), T^n(y)) > c$.

- neuronale Dynamik
- Populationsdynamik
- Konvektionsströmungen in der Erdatmosphäre (und damit meteorologische Dynamik)
- die langfristige Dynamik des Sonnensystems

Die neuronale Dynamik ist für uns von besonderem Interesse, sie diskutieren wir ausführlicher. Das Chialvo-System ist ein mathematisches Modell der Dynamik einzelner Neuronen in diskreter Zeit. Das System beschreibt das Spannungspotential der Membran einzelner Neuronen und den Wiederaufbau-Prozess des Potentials. Für ein vereinfachtes Chialvo-System lässt sich eine chaotische Dynamik rigoros nachweisen, und für das originale System haben wir numerische Ergebnisse, die eine chaotische Dynamik nahelegen.[33] Das Gehirn als Ganzes lässt sich durch ein neuronales Netzwerk modellieren, das in seiner mathematischen Beschreibung einem Netzwerk gekoppelter Oszillatoren entspricht. In den Neurowissenschaften werden in der Regel mehrschichtige neuronale Netzwerke als geeignete Modelle angesehen. Im Allgemeinen ist es schwierig, diese Modelle rigoros zu analysieren. Dennoch wissen wir, dass Interaktionen auf Netzwerkebene zu Chaos führen können.[34] Insbesondere für zweischichtige neuronale Netzwerke liegen aktuelle Ergebnisse vor. Wenn rekurrente Verbindungen, selbst mit geringem Rückkopplungsanteil, vorliegen, lässt sich chaotische Dynamik nachweisen.[35]. Wenn wir uns das Gehirn nun als ein mehrschichtiges Netzwerk mit vielen Rückkopplungen vorstellen, liegt die Annahme nahe, dass dieses System chaotisch und insbesondere sensitiv ist.

Bis hierhin sprachen wir über rein deterministische mathematische Modelle makroskopischer physikalischer Vorgänge. Nun legen jedoch quantenphysikalische Vorgänge die einzelnen Zustände makroskopischer dynamischer Systeme nicht punktgenau fest. Wir erhalten nur eine Wahrscheinlichkeitsverteilung auf dem Raum der Zustände solcher Systeme. Hieraus folgt, dass Vorgänge, die durch chaotische, insbesondere sensitive dynamische Systeme trefflich modelliert sind, nicht physikalisch determiniert sein können. Nur Wahrscheinlichkeiten für Mengen möglicher Entwicklungen sind physikalisch bestimmt, wenn wir quantenphysikalische Unbestimmtheit mit chaotischer Dynamik kombinieren. Die Positionen der Planeten im Sonnensystem sind langfristig physikalisch nicht exakt bestimmt. Genauso wenig ist das morgige Wetter ohne einen gewissen stochastischen Spielraum schon festgelegt. Auch wie sich unser genetischer Co-

[33] Siehe Neunhäuserer (2026).
[34] Siehe hierzu van Vreeswijk und Sompolinsky (1996).
[35] Siehe Lin (2009,?) zu dieser Entwicklung in den Neurowissenschaften

de unter gleichen Rahmenbedingungen auswirkt, ist physikalisch nicht eindeutig determiniert. Schließlich liegt aus physikalischen Gründen jetzt nicht fest, was ich oder der Leser nach Beendigung dieses Absatzes tun wird. In Abschnitt 4.3 wird diese Annahme für uns von entscheidender Bedeutung sein.

Der Grad der Sensitivität eines dynamischen Systems und damit der Unbestimmtheit der Entwicklung des modellierten Vorgangs lässt sich sogar quantifizieren. Hierzu dient die Entropie. Die topologische Entropie beschreibt die Komplexität, die durch die Dynamik des Systems erzeugt wird. Positive topologische Entropie impliziert für viele hinreichend glatte dynamische Systeme eine exponentielle Sensitivität. In diesem Fall können wir sicher sein, dass quantenphysikalische Unbestimmtheiten erhebliche makroskopische Effekte zeitigen. Zuweilen wird chaotische Dynamik sogar durch positive Entropie definiert. Leider können wir die topologische Entropie bisher nur für einfache Systeme rigoros bestimmen oder abschätzen. Wir vermuten, dass alle oben genannten Systeme positive Entropie haben; ein mathematischer Beweis dieser Vermutung steht allerdings in vielen Fällen aus. Neben der topologischen Entropie ist die metrische Entropie von Interesse. Diese misst die durchschnittliche Information, die durch ein dynamisches System relativ zu einem invarianten Wahrscheinlichkeitsmaß produziert wird. Die metrische Entropie ist stets eine untere Abschätzung der topologischen Entropie. Positive metrische Entropie impliziert immer positive topologische Entropie, und die topologische Entropie lässt sich sogar durch die metrische Entropie realisieren. Sehen wir ein invariantes Wahrscheinlichkeitsmaß voller Entropie als vollständige Beschreibung eines physikalischen Vorgangs, so ist dieser Vorgang physikalisch nicht determiniert. Wir müssen unter dieser Voraussetzung nicht den Umweg über Sensitivität und quantenphysikalische Unbestimmtheit nehmen. Diese Voraussetzung kann jedoch mit gutem Grund angezweifelt werden: Ein invariantes Wahrscheinlichkeitsmaß beschreibt nur typische Entwicklungen und nicht alle möglichen Entwicklungen eines dynamischen Systems.

Neben dem Entropiebegriff der Theorie dynamischer Systeme ist auch der Entropiebegriff der Thermodynamik von Bedeutung. Dieser Entropiebegriff hat eine andere Definition. Wir betrachten ein geschlossenes physikalisches System, das aus vielen Molekülen in thermischer Bewegung besteht. Die Entropie eines solchen Systems ist ein Maß für seine Unordnung; genauer quantifiziert sie die Anzahl der mikroskopischen Anordnungen, die dem makroskopischen Ge-

samtzustand des Systems entsprechen.[36] Mit der Zeit nimmt die Entropie jedes geschlossenen Systems zu, und langfristig nähert sich das System dem Zustand maximal möglicher Entropie, dem thermodynamischen Gleichgewicht. Die treibende Kraft dieses Vorgangs ist der Brownsche Prozess, der die Bewegungen der einzelnen Moleküle stochastisch beschreibt. Es wird oftmals behauptet, dass die Bewegung der Moleküle trotz ihrer stochastischen Beschreibung physikalisch durch die Gesetze der Mechanik determiniert sei. Dies ist nicht der Fall, da sich die vielfältigen Kollisionen der einzelnen Moleküle nur durch ein chaotisches dynamisches System deterministisch beschreiben lassen. Wie wir schon gesehen haben, ist ein Vorgang, der durch solch ein System beschrieben wird, nicht physikalisch determiniert und wesentlich zufällig. Der stochastische Brownsche Prozess sollte also realistisch interpretiert werden. Reeller Zufall ist damit die Grundlage der Thermodynamik, einer unverzichtbaren physikalischen Theorie. Viele versuchen sogar, die Richtung des Zeitpfeils thermodynamisch durch die unumkehrbare Erhöhung der Entropie zu erklären. Wir schließen uns dem nicht an. Sollte sich das gesamte Universum eines Tages im thermodynamischen Gleichgewicht befinden, ist dies nicht notwendigerweise das Ende der Zeit; sie trägt ihre eigene innere Ordnung mit sich.

Wir haben in diesem Abschnitt gesehen, dass der Determinismus für komplexe makroskopische Vorgänge in der physikalischen Realität nicht überzeugend ist. Trotzdem hält sich das deterministische Paradigma hartnäckig in der Physik und in der Philosophie. Wir sehen hierfür im Wesentlichen zwei Gründe: Erstens ist eine konsequent stochastische Beschreibung der Naturgesetze, die physikalisch determinierte Vorgänge nur als Grenzfall enthält, mathematisch sehr anspruchsvoll und aufwendig. Der zweite Grund ist philosophischer Natur: Die Abkehr vom Determinismus stellt ein grundlegendes Dogma der monistischen, physikalistischen oder allgemeiner naturalistischen Metaphysik, nämlich die kausale Abgeschlossenheit der physikalischen Realität, zur Disposition. Die meisten an den empirischen Wissenschaften orientierten Denker sind ausdrücklich oder implizit der Auffassung, dass nichts außerhalb der physikalischen Realität einen Einfluss auf diese hat. Mit unserer pluralistischen Metaphysik ist die kausale Abgeschlossenheit der physikalischen Realität und der physikalische Determinismus unvereinbar. Hiervon wird in Kapitel 4 zu sprechen sein.

[36] Die berühmte Formel von Boltzmann bestimmt die Entropie durch $S = k_B \ln(W)$, wobei $k_B = 1\,380649 \times 10^{-23}$ J/K die Boltzmann-Konstante ist und W die Anzahl der mikroskopischen Anordnungen, die dem makroskopischen Zustand entsprechen. Siehe hierzu Greiner (1995)