



Christian Loew und Andreas Hüttemann

21.1 Einleitung

Schon in der Antike und im Mittelalter wurde diskutiert, ob zukünftige Ereignisse, darunter unsere Entscheidungen und Handlungen, bereits festgelegt sind. Die Gründe, weshalb Ereignisse als determiniert galten, waren allerdings ganz unterschiedlicher Natur. Aristoteles hat beispielsweise diskutiert, ob zukünftige Ereignisse allein deshalb schon festgelegt sind, weil Aussagen über sie (z. B. ‚Morgen findet eine Seeschlacht statt‘) bereits jetzt entweder wahr oder falsch sind. Den Ausgangspunkt einer anderen einflussreichen Diskussion bildete Augustinus’ Frage, ob der Umstand, dass Gott alle Ereignisse vorhersieht, bedeutet, dass alles bereits festgelegt ist. Eine dritte Überlegung setzt beim Willen Gottes an. Wenn Gott allmächtig ist und sein Wille unabänderlich, dann scheint auch das von ihm gewollte Weltgeschehen unabänderlich.

Im Mittelpunkt dieses Kapitels soll aber eine andere Art von Determinismus stehen, näm-

lich der naturgesetzliche (oder nomologische) Determinismus. In der Frühen Neuzeit hat sich die Auffassung durchgesetzt, dass sich das Verhalten (körperlicher) Systeme durch Naturgesetze charakterisieren lasse. Dem naturgesetzlichen Determinismus zufolge sind alle Zustände eines Systems eindeutig durch den Zustand des Systems zu einem bestimmten Zeitpunkt und die Naturgesetze festgelegt. Wenn in heutigen Debatten der Determinismus als Herausforderung für den freien Willen diskutiert wird, steht meistens der naturgesetzliche Determinismus im Mittelpunkt. Worin genau besteht aber dieser Determinismus? Und welche Gründe haben wir, ihn für wahr zu halten?

Im Folgenden wird zunächst der naturgesetzliche Determinismus charakterisiert (s. Abschn. 21.2) und von anderen Positionen unterschieden (s. Abschn. 21.2, 21.3). Abschn. 21.4 befasst sich mit der Frage, ob die grundlegenden Theorien der Physik tatsächlich deterministisch sind. Abschließend werden diese Ergebnisse im Blick auf die Willensfreiheitsdebatte bewertet (s. Abschn. 21.5).

C. Loew (✉)

Department of Historical, Philosophical and Religious Studies, Umeå Universitet, Umeå, Schweden

E-Mail: christian.loew@umu.se

A. Hüttemann

Philosophisches Seminar, Universität zu Köln, Köln, Deutschland

E-Mail: ahuettem@uni-koeln.de

21.2 Naturgesetzlicher Determinismus

In der Literatur wird über den Determinismus auf zweierlei Weisen gesprochen: als Eigenschaft von Theorien und als Eigenschaft von

Systemen (einschließlich der Welt als Ganzes). Im Folgenden soll gezeigt werden, dass es wichtig ist, diese beiden Redeweisen auseinanderzuhalten.

Naturgesetze beschreiben die zeitliche Entwicklung von Systemen durch Gleichungen, die bestimmen, wie sich der Zustand eines Systems von einem Zeitpunkt zu einem anderen verändert (z. B. Bewegungsgleichungen). Um den Determinismus genauer charakterisieren zu können, muss zunächst bestimmt werden, was in diesem Zusammenhang mit ‚Zustand‘ gemeint ist.

Was als Zustand gilt, ist relativ zu einem bestimmten Gesetz oder einer Theorie. Als Zustand eines Systems werden in diesem Kapitel alle Eigenschaften des Systems zu einem bestimmten Zeitpunkt verstanden, über die man Informationen haben muss, um die relevanten Bewegungsgleichungen lösen zu können, d. h., um die Entwicklungen des Systems so genau vorherzusagen, wie es das relevante Gesetz zulässt. Diese Charakterisierung erlaubt, dass sich in manchen Fällen aus dem Lösen der Bewegungsgleichungen mithilfe von Informationen über den Zustand keine exakte Vorhersage ergibt. In solchen Fällen gibt es mehr als eine Lösung oder die Lösung liefert nur eine Wahrscheinlichkeit für das Verhalten des Systems. Die entsprechenden Informationen charakterisieren den Zustand des Systems aber dennoch insofern vollständig, als man selbst mit zusätzlichen Informationen über die Eigenschaften des Systems zum entsprechenden Zeitpunkt keine genaueren Vorhersagen aus der Theorie ableiten könnte. (Physikerinnen benutzen den Begriff des Zustands manchmal auch in einem engeren Sinne, sodass er nur Eigenschaften umfasst, die sich über die Zeit hinweg verändern. Dieser engere Begriff ist aber im gegenwärtigen Kontext nicht relevant.)

Welche Eigenschaften des Systems relevant sind, um die entsprechenden Bewegungsgleichungen lösen zu können, hängt von der jeweiligen Theorie ab. Der Zustand eines Masse-

teilchens in der klassischen Mechanik umfasst seine Masse, seinen Ort und seine Geschwindigkeit (oder Ort und Impuls). Andere relevante Größen, wie die kinetische Energie, lassen sich aus diesen Größen ableiten. Die Newton'schen Bewegungsgleichungen erlauben dann – bei gegebener Masse –, von dem Ort und der Geschwindigkeit eines isolierten Masseteilchens zu einem gegebenen Zeitpunkt seinen Ort und seine Geschwindigkeit zu anderen Zeitpunkten abzuleiten. In anderen Theorien, etwa in der Quantenmechanik, benötigt man hingegen andere Informationen über die Eigenschaften eines Systems zu einem Zeitpunkt, um die relevanten Bewegungsgleichungen zu lösen. Zustände sind also relativ zu diesen Theorien und können je nach Theorie unterschiedliche Eigenschaften umfassen.

Mithilfe des Begriffs eines Zustands kann nun gefragt werden, ob ein Naturgesetz oder eine Theorie, die mehrere Naturgesetze und Annahmen umfasst, deterministisch ist. (Es ist nicht immer klar, was genau Teil einer Theorie ist. Darauf wird in Abschn. 21.4 kurz eingegangen.) Unter Theorien-Determinismus soll im weiteren Verlauf Folgendes verstanden werden:

(T-Det): Eine Theorie oder ein Naturgesetz ist deterministisch_T, genau dann, wenn für alle (aktualen oder möglichen) Systeme, auf die die Theorie oder das Naturgesetz zutrifft, gilt: Wenn zwei dieser Systeme zu einem Zeitpunkt hinsichtlich ihres Zustands übereinstimmen, dann stimmen sie zu allen Zeitpunkten überein (vgl. Butterfield 2005).

Jede Theorie trifft auf eine Vielzahl möglicher oder aktueller Systeme zu. Die Newton'sche Mechanik kann zum Beispiel benutzt werden, um zu beschreiben, wie sich die Welt als Ganzes über die Zeit hinweg entwickelt. Sie trifft aber auch auf ein einzelnes, von seiner Umgebung isoliertes Fadenpendel zu oder auf eine Welt, die nur aus einem einzelnen Masseteilchen besteht.

Laut obiger Definition gilt für alle Systeme, auf die eine deterministische Theorie (oder ein deterministisches Naturgesetz) zutrifft, und die zu einem Zeitpunkt in dem gleichen Zustand

sind, dass sie dann auch zu allen Zeitpunkten in dem gleichen Zustand sind. Es folgt also, dass eine deterministische Theorie (oder ein deterministisches Naturgesetz), gegeben den Zustand eines Systems zu einem einzigen Zeitpunkt, alle anderen Zustände des Systems eindeutig festlegt. Wenn keine solche Festlegung bestünde, dann müsste es möglich sein, dass zwei Systeme zu einem Zeitpunkt in dem gleichen Zustand sind, aber zu einem anderen Zeitpunkt in verschiedenen Zuständen. Dies schließt die obige Definition aber aus.

Man kann den Determinismus auch entweder bloß für die Vergangenheit oder – was im Kontext der Willensfreiheitsdebatte häufiger passiert – bloß für die Zukunft definieren. Eine Theorie oder ein Gesetz könnte zum Beispiel den zukünftigen Verlauf eines Systems eindeutig festlegen, aber nicht seinen Verlauf in der Vergangenheit. Demnach müssten alle Systeme, die durch die Theorie korrekt beschrieben werden und zu einem Zeitpunkt in ihrem Zustand übereinstimmen, auch zu allen *späteren* Zeitpunkten übereinstimmen, aber nicht notwendigerweise zu allen früheren Zeitpunkten. Da die fundamentalen Bewegungsgleichungen der Physik, die im Folgenden betrachtet werden, aber zeitsymmetrisch sind, sind diese Einschränkungen von keinem großen Belang.

In welchem Sinne ist hier von ‚Festlegung‘ die Rede? Man könnte glauben, wenn ein Zustand eines Systems andere Zustände im Sinne des Determinismus festlege, handle es sich dabei um eine besondere Art von Erzwingung oder Hervorbringung eines Zustands durch einen anderen. Was genau die metaphysische Relation zwischen den relevanten Zuständen ist, wird durch die obige Definition aber offengelassen. Alles, was die Definition besagt, ist, dass aus einer Beschreibung des Systems zu einem Zeitpunkt und der deterministischen Theorie *logisch folgt*, in welchen Zuständen das System zu allen anderen Zeitpunkten ist. Damit eine Theorie oder ein Gesetz deterministisch ist, muss diese Eindeutigkeit, die sich der logischen Folgerung

verdankt, für alle möglichen Zustände, die die Gleichung zulässt, also für alle Lösungen der Gleichung gelten.

Ob eine Theorie (oder ein Naturgesetz) deterministisch_T ist, hängt somit allein vom Inhalt der Theorie oder des Gesetzes ab: davon nämlich, ob für jedes System, auf welches die Theorie zutrifft, aus einer Beschreibung des Systems zu einem Zeitpunkt und den mathematischen Gleichungen, die Teil der Theorie sind, der Zustand des Systems zu allen anderen Zeitpunkten eindeutig abgeleitet werden kann. Ob eine Theorie (oder ein Naturgesetz) deterministisch ist, ist damit unabhängig davon, ob man Naturgesetze als bloße Generalisierungen wie in der an Hume anschließenden Tradition, im Armstrong’schen Sinne als Instantiierungen einer Erzwingungsrelation oder im Sinne des dispositionalen Essentialismus als in dispositionalen Eigenschaften begründet auffasst.

Bisher wurde in diesem Kapitel darüber gesprochen, was es heißt, dass Naturgesetze oder Theorien deterministisch sind. Häufig – insbesondere im Kontext der Willensfreiheitsdebatte – interessieren wir uns aber dafür, ob ein bestimmtes System und insbesondere die Welt als Ganzes deterministisch ist. (Der Einfachheit halber werden im Folgenden nur ganze Welten behandelt. Ebenso gut könnte aber gefragt werden, ob zum Beispiel ein einzelnes Pendel, das von kausalen Einflüssen aus seiner Umgebung isoliert ist, ein deterministisches System ist.)

Eine einflussreiche Definition des Determinismus angewandt auf Systeme ist die folgende:

(*S-Det*): Eine Welt w ist deterministisch_S, genau dann, wenn jede Welt mit den gleichen Gesetzen wie w , die mit w zu einem Zeitpunkt bezüglich ihres Zustandes übereinstimmt, mit w zu allen Zeitpunkten bezüglich ihres Zustandes übereinstimmt (vgl. Earman 1986, 13).

Die Definition sagt, dass in deterministischen Welten die in ihnen geltenden Naturgesetze einen eindeutigen zeitlichen Verlauf der Welt festlegen. Wenn unsere Welt derart ist, dass – gegeben, wie die Welt zu einem Zeitpunkt

ist, d. h. gegeben ihr Zustand zu diesem Zeitpunkt (in S-Det wird vorausgesetzt, dass Welten theorieunabhängige Zustände besitzen) – die Naturgesetze eindeutig festlegen, wie sie zu allen anderen Zeitpunkten ist, dann handelt es sich um eine deterministische Welt. Andernfalls gäbe es Welten mit den gleichen Naturgesetzen, die mit unserer Welt zu einem Zeitpunkt übereinstimmen, aber nicht zu einem späteren (oder früheren) Zeitpunkt.

T-Det und S-Det sind nicht äquivalent. Erstens kann es sein, dass eine Theorie deterministisch_T ist (T-Det erfüllt), aber ein von dieser Theorie beschriebenes System S-Det nicht erfüllt, also indeterministisch_S ist. Eine solche Divergenz kann entstehen, wenn eine deterministische Theorie zwar auf ein System zutrifft, es aber nicht vollständig beschreibt. Wir können uns zum Beispiel ein deterministisches Gesetz vorstellen, das nur die Temperatur von Systemen beschreibt. Dieses Gesetz ist deterministisch im Sinne von T-Det, wenn für alle Systeme, auf die das Gesetz zutrifft, gilt: Wenn Systeme zu einem Zeitpunkt bezüglich ihrer Temperatur übereinstimmen, dann stimmen sie zu allen Zeitpunkten bezüglich ihrer Temperatur überein. Aber daraus folgt nicht, dass eine Welt, auf die dieses Gesetz zutrifft, deterministisch im Sinne von S-Det ist. Selbst wenn die Temperatur von Systemen sich deterministisch entwickelt, muss dies nicht für andere Eigenschaften der Fall sein.

Zweitens kann es deterministische_S Systeme geben, ohne dass die auf sie zutreffenden Gesetze oder Theorien deterministisch_T sind. Das liegt daran, dass im Rahmen von T-Det für deterministische Gesetze/Theorien gefordert wird, dass jeder *mögliche* Zustand, in dem sich ein System, auf das die Gesetze/Theorien zutreffen, zu einem gegebenen Zeitpunkt befinden kann, die Zustände des Systems zu allen anderen Zeitpunkten eindeutig festlegt. Wenn wir uns aber für die Frage interessieren, ob unsere Welt oder ein bestimmtes System deterministisch ist im Sinne von S-Det, dann fragen wir uns nur, ob jeder *tatsächliche* Zustand *dieses* Systems oder unserer Welt die Zustände zu allen anderen Zeitpunkten eindeutig festlegt.

S-Det erlaubt insbesondere Folgendes: Angenommen es gibt eine Welt W_1 , in der sich bloß ein Masseteilchen befindet, das die Masse m hat und sich zu t mit 50 km/h im absoluten Raum bewegt. W_1 ist deterministisch_S, wenn das Masseteilchen einer Bewegungsgleichung genügt, so dass gilt, dass alle anderen Welten, in denen die gleichen Gesetze gelten und in denen sich bloß ein Masseteilchen mit der Masse m zu t mit 50 km/h bewegt, mit W_1 auch bezüglich aller vergangenen und zukünftigen Zustände übereinstimmen. Es könnte nun eine Welt W_2 geben, die W_1 in allem gleicht, außer dass sich das Teilchen mit 49 km/h statt mit 50 km/h im absoluten Raum bewegt, und die, obwohl sie derselben Bewegungsgleichung genügt, indeterministisch_S ist, weil für diesen Geschwindigkeitswert mehrere Lösungen möglich sind. Die Existenz einer solchen möglichen Welt ändert nichts daran, dass W_1 deterministisch im Sinne von S-Det ist. W_1 wäre dann eine deterministische_S Welt, obwohl W_2 indeterministisch_S ist und damit die Bewegungsgleichung für W_1 und W_2 indeterministisch_T ist. Kurzum: Ohne weitere Zusatzannahmen impliziert weder S-Det T-Det noch T-Det S-Det.

21.3 Abgrenzung: Was Determinismus nicht ist

Als eine der frühesten Formulierungen des Determinismus wird oft die folgende Passage von Laplace zitiert (vgl. Kožnjak 2015 für mehr historischen Hintergrund):

Wir müssen daher den gegenwärtigen Zustand des Weltalls als die Wirkung seines früheren und als die Ursache des folgenden Zustands betrachten. Eine Intelligenz, welche für einen gegebenen Augenblick alle in der Natur wirkenden Kräfte sowie die gegenseitige Lage der sie zusammensetzenden Elemente kennte, und überdies umfassend genug wäre, um diese gegebenen Größen der Analysis zu unterwerfen, würde in derselben Formel die Bewegungen der größten Weltkörper wie des leichtesten Atoms umschließen; nichts würde ihr ungewiß sein und Zukunft wie Vergangenheit würden ihr offen vor Augen liegen (Laplace 1819, 2–3).

Laplace scheint hier tatsächlich anzunehmen, dass die Welt deterministisch ist im Sinne von

S-Det. Allerdings formuliert er diesen Gedanken mithilfe des Begriffs einer Intelligenz, die die Zukunft berechnen kann. Der mit dieser Überlegung einhergehende Begriff der Vorhersagbarkeit wird allerdings in der gegenwärtigen Wissenschaftstheorie von dem des Determinismus strikt unterschieden. Während der Determinismus (S-Det) ein metaphysischer Begriff ist, der den Verlauf der Welt betrifft, ist der Begriff der Vorhersagbarkeit ein epistemischer Begriff, der unser Wissen vom Verlauf der Welt betrifft. Das Beispiel deterministischer Chaostheorien zeigt, dass zumindest für Wesen, die Zustände der Welt nur mit endlicher Genauigkeit beschreiben können, das Verhalten deterministischer Systeme unvorhersagbar sein kann (vgl. Earman 2007, 1388–1391).

Laplace verwendet im obigen Zitat auch kausale Terminologie. Der gegenwärtige Zustand des Universums wird als Wirkung eines vorangegangenen Zustands betrachtet. In der Tat benutzen viele ältere Definitionen des Determinismus kausales Vokabular. Manchmal wird der Determinismus sogar mit der These gleichgesetzt, dass jedes Ereignis eine hinreichende Ursache hat.

Gegenwärtige Determinismusdefinitionen versuchen aus verschiedenen Gründen, ohne kausale Terminologie auszukommen. Erstens wird der der Begriff der Kausalität selbst kontrovers diskutiert (vgl. Hüttemann 2018). Zweitens ist nicht klar, dass alle Ursachen ihre Wirkungen eindeutig festlegen, wie es der Determinismus erfordern würde. Es scheint, dass auch in einer indeterministischen Welt Ereignisse in Ursache-Wirkungs-Relationen stehen könnten. In solch einer Welt würden nicht alle Ursachen ihre Wirkungen eindeutig festlegen. Universelle Kausalität garantiert also keinen Determinismus. Und drittens sind, wie oben angesprochen, viele gegenwärtige physikalische Theorien deterministisch sowohl in Richtung Vergangenheit als auch in Richtung Zukunft. Es wird aber normalerweise angenommen, dass Kausalität ausschließlich (oder überwiegender Weise) zukunftsgerichtet ist. In der Tat ist die Zeit-Symmetrie der physikalischen Gesetze ein Grund dafür, dass manche Philosophen bezweifeln, dass es überhaupt Kausalität gibt.

Eine andere wichtige Abgrenzung betrifft den Unterschied zwischen dem Determinismus und der These, dass alles, was passiert, notwendig ist. Der Determinismus alleine impliziert nicht, dass jedes Ereignis notwendig ist und nicht hätte anders sein können. Er impliziert höchstens eine Art konditionaler Notwendigkeit: Gegeben den vollständigen Zustand der Welt zu einem beliebigen Zeitpunkt (z. B. den Anfangszustand) sowie die Gesetze, folgen alle anderen Zustände mit logischer Notwendigkeit. Daraus ergibt sich aber nicht, dass alles, was passiert, notwendig ist. Die Wahrheit des Determinismus lässt schließlich vollkommen offen, ob der Anfangszustand der Welt und die Gesetze notwendig sind. Und es scheint sogar sehr plausibel, dass eine deterministische Welt in einem anderen Zustand hätte anfangen können. Auch wenn eine Welt in einem Zustand S_1 anfang und sich daraus alles Weitere mit Notwendigkeit ergibt, hätte die Welt auch in einem anderen Zustand, S_2 , anfangen können, woraus sich dann (unter Voraussetzung derselben deterministischen Gesetze) andere Zustände mit Notwendigkeit ergeben hätten.

21.4 Sind die grundlegenden physikalischen Theorien deterministisch?

Unterbestimmtheit: Eine grundlegende Frage ist, wie und ob wir überhaupt wissen können, ob die Welt deterministisch ist. Dazu muss erstens untersucht werden, welche Naturgesetze (oder Theorien) unsere Welt vollständig beschreiben. Und zweitens muss untersucht werden, ob diese Naturgesetze für die Entwicklung der Welt eindeutige Lösungen liefern (wie oben beschrieben, können Naturgesetze dies für unsere Welt tun, ohne deterministisch im Sinne von T-Det zu sein).

Patrick Suppes (1993) hat bestritten, dass die Frage, ob die Welt deterministisch ist, empirisch geklärt werden kann. Mit Verweis auf ein Theorem, wonach es Prozesse gibt, die gleich gut als deterministische Prozesse der klassischen Mechanik oder als indeterministische Prozesse modelliert werden können, argumentiert Suppes,

dass dies Fälle von empirischer Unterbestimmtheit seien. Das heißt, auch die Gesamtmenge aller empirischer Daten bestimmt nicht, ob die relevanten Systeme deterministisch oder indeterministisch sind.

Suppes' Argument wurde in der Folge kontrovers diskutiert (Werndl 2009/2013; Winnie 1997; Wüthrich 2011). Die meisten Autorinnen sind sich inzwischen einig, dass es Fälle von empirischer Unterbestimmtheit höchstens dann gibt, wenn man nicht alle empirischen Informationen über ein System besitzt. Aber selbst in Fällen von empirischer Unterbestimmtheit gibt es typischerweise gute Gründe, ein bestimmtes Modell zu bevorzugen (z. B. die größere Vorhersagekraft eines Modells oder indirekte Evidenz, die in manchen Fällen für deterministische Modelle spricht, vgl. Werndl 2013, 2263–2264). Es gibt daher gute Gründe für die Annahme, dass sich die Schwierigkeiten bei der Beantwortung der Frage, ob unsere Welt deterministisch ist, nicht von denen unterscheiden, die generell bei der Beantwortung empirischer Fragestellungen auftreten (eine Übersicht über den Stand der Diskussion bietet Werndl 2016).

Klassische Mechanik: Die Frage, ob die klassische Mechanik deterministisch ist, soll hier anhand eines Beispiels etwas ausführlicher behandelt werden, um deutlich zu machen, von welchen Überlegungen eine positive oder negative Antwort abhängen kann (ausführliche Darstellungen des Diskussionsstandes bezüglich dieser und anderer Theorien findet man in Earman 1986; 2007).

Laplace, das legt die oben zitierte Passage nahe, war offensichtlich der Meinung, dass die klassische Mechanik deterministisch ist. Gleichwohl war schon im 19. Jahrhundert bekannt, dass die sich aus dem zweiten Newton'schen Gesetz ergebende Differentialgleichung nicht immer eindeutige Lösungen liefert. Dies wurde aber zunächst nicht als Beleg für eine indeterministische Welt aufgefasst (van Strien 2014). Vielmehr suchte man nach Gründen, weshalb die relevanten Anfangsbedingungen nicht in unserer Welt realisiert sind, d. h. nach Gründen, weshalb die uneindeutigen Lösungen als ‚un-

physikalisch‘ ausgeschlossen werden können (s. u., wo genau diese Strategie auch für die sog. Nortonkuppel diskutiert wird). Auch wenn T-Det nicht erfüllt war, wurde also an der These, dass unsere Welt deterministisch ist, nicht gezweifelt.

Einer der in jüngerer Zeit am meisten diskutierten Fälle, die belegen sollen, dass die klassische Mechanik indeterministisch ist, ist die sogenannte ‚Nortonkuppel‘ (nach John Norton, der das Beispiel ausführlich diskutiert hat). Angenommen wird eine Kuppel, deren Oberfläche eine ganz spezielle Form besitzt, nämlich derart, dass auf ein Teilchen mit einer Einheitsmasse, das auf der Kuppeloberfläche sitzt, die folgende Kraft wirkt:

$$F = br^{1/2}$$

Hierbei bezeichnet r den räumlichen Abstand, den das fragliche Teilchen von der Spitze der Kuppel hat (b ist eine irrelevante Konstante, die im Folgenden vernachlässigt wird). Dieser Abstand wird auf der gekrümmten Kuppeloberfläche bestimmt. Wenn man diese Kraftfunktion in das zweite Newton'sche Gesetz einsetzt, erhält man

$$d^2r(t)/dt^2 = r^{1/2}$$

Wenn man weiter von der Anfangsbedingung ausgeht, dass das Teilchen bei t_0 auf der Kuppelspitze sitzt, sodass $r=0$ gilt, erhält man das erstaunliche Ergebnis, dass nun zwei verschiedene zeitliche Abläufe möglich sind. Erstens – und erwartbar – kann das Teilchen für alle $t > t_0$ auf der Spitze sitzen bleiben. Zweitens kann es aber auch zu jedem beliebigen Zeitpunkt T spontan beginnen, die Kuppel hinunterzurollen.

Lösung 1 lautet: $r(t)=0$ für alle t .

Lösung 2 lautet: $r(t)=0$ für t kleiner gleich T und $r(t) = 1/144 (t-T)^4$ für t größer T .

Beide Lösungen erfüllen die Anfangsbedingung $r(t_0)=0$, stimmen aber ab T nicht mehr überein.

T-Det ist also für das zweite Newton'sche Gesetz nicht erfüllt, weil es mögliche Systeme gibt, auf welche die Theorie zutrifft und die zu einem Zeitpunkt übereinstimmen, aber nicht zu einem späteren Zeitpunkt: zwei Nortonkuppeln,

auf denen zu t_0 jeweils ein Teilchen sitzt, die sich dann aber unterschiedlich entwickeln.

Die Nortonkuppel wurde in der wissenschaftstheoretischen Literatur sehr kontrovers diskutiert (eine gute Übersicht findet man in Fletcher 2012). Eine wesentliche Frage ist, was wir daraus eigentlich lernen. Norton selbst resümiert:

The dome is not intended to represent a real physical system. The dome is purely an idealization within Newtonian theory. On our best understanding of the world, there can be no such system. For an essential part of the setup is to locate the mass *exactly* at the apex of the dome and *exactly* at rest. Quantum mechanics assures us that cannot be done. What the dome illustrates is indeterminism within Newtonian theory in an idealized system that we do not expect to be realized in the world (Norton 2008, 793).

Nortons Anspruch besteht also darin, gezeigt zu haben, dass T-Det für die klassische oder Newton'sche Mechanik nicht gilt. Dies bedeutet aber nicht, dass es konkrete physikalische Systeme gibt, für die S-Det nicht gilt, da die Anfangsbedingungen, die bei der Nortonkuppel relevant sind, in unserer Welt nicht realisiert sein können.

Aber sogar die These, dass die Nortonkuppel zeige, dass die Newton'sche Mechanik indeterministisch (im Sinne von T-Det) ist, ist umstritten. Samuel Fletcher (2012) schlägt vor, die Diskussion so zusammenzufassen, dass ein Dissens darüber besteht, was die Newton'sche Mechanik eigentlich umfasst. Nortons eigene Einschätzung ist unkontrovers, solange man die Newton'sche Mechanik im Wesentlichen mit dem zweiten Newton'schen Gesetz identifiziert. Wenn man aber annimmt, dass zur Newton'schen Mechanik noch weitere Annahmen gehören, z. B. darüber, wie die Kraftfunktionen beschaffen sein sollten, oder darüber, welche Arten von Idealisierungen zulässig sind, dann lässt sich sogar bestreiten, dass die Nortonkuppel ein Gegenbeispiel zum Theoriendeterminismus der Newton'schen Mechanik ist. Umstritten ist in den meisten Fällen aber, ob solche Zusatzannahmen gut motiviert sind.

Quantenmechanik: Die Quantenmechanik gilt als wahrscheinlichste Grundlage für In-

determinismus in unserer Welt. Ob aus ihr aber tatsächlich folgt, dass die aktuelle Welt indeterministisch ist, hängt davon ab, wie man die Theorie interpretiert. Es gibt nämlich Interpretationen der Theorie, wonach die Welt deterministisch wäre.

Radioaktive Substanzen, die wir gewöhnlich mithilfe der Quantenmechanik beschreiben, scheinen die besten Beispiele für indeterministische Systeme in unserem Universum zu sein. So kann zum Beispiel für ein einzelnes Atom nur eine Wahrscheinlichkeit dafür angegeben werden, zu welchem Zeitpunkt es zerfallen wird. Wie aber oben gesagt wurde, folgt daraus, dass *wir* den Verlauf quantenmechanischer Systeme nicht eindeutig vorhersagen können, nicht, dass durch die zugrundeliegenden Naturgesetze kein eindeutiger Verlauf festgelegt ist.

Zwei grundlegende Bestandteile des mathematischen Apparates der Quantenmechanik sind die Wellenfunktion und die Schrödingergleichung. Die Wellenfunktion beschreibt den Zustand von Systemen, die Schrödingergleichung beschreibt, wie sich die Wellenfunktion über die Zeit hinweg entwickelt. Um die Frage, ob die Quantenmechanik deterministisch oder indeterministisch ist, beantworten zu können, muss zweierlei geklärt werden: Erstens, ist die Schrödingergleichung deterministisch? Zweitens, liefert die Wellenfunktion, deren Entwicklung die Schrödingergleichung beschreibt, eine vollständige Beschreibung von Systemen (vgl. für das Folgende Earman 2007 und insb. Wüthrich 2011)?

Zunächst zur ersten Frage: Norton hat gezeigt, dass – wie im Falle des zweiten Newton'schen Gesetzes – Fälle konstruiert werden können, sodass die Voraussetzung für die Eindeutigkeit der Lösungen der relevanten Differentialgleichung nicht erfüllt sind. Dabei handelt es sich um sogenannte *quantum super tasks*, Systeme bestehend aus unendlich vielen Teilchen, die auf eine sehr spezifische Weise miteinander wechselwirken (Norton 1999). Analog zum schon diskutierten klassischen Fall ist es auch hier so, dass die Schrödingergleichung unter Zusatzannahmen, z. B. bestimmte Rand-

bedingungen betreffend, deterministisch wird (Norton 1999). Diese Fälle sind also kompatibel damit, dass die Schrödingergleichung den Verlauf der aktualen Welt eindeutig festlegt.

Die Antwort auf die zweite Frage hängt davon ab, wie man die Quantenmechanik interpretiert. Sogenannte ‚Kollapstheorien‘ implizieren, dass der zeitliche Verlauf der Wellenfunktion nicht (allein) durch die Schrödingergleichung bestimmt wird. Eine historisch besonders einflussreiche Kollapstheorie, die ‚Kopenhagener Deutung‘, nimmt ein weiteres dynamisches Gesetz (zusätzlich zur Schrödingergleichung) an, das indeterministisch ist (das sog. ‚Kollaps-Postulat‘). Allerdings wird diese Interpretation innerhalb der Philosophie der Physik kontrovers diskutiert. Eine alternative Kollapstheorie wurde von den Physikern Giancarlo Ghirardi, Alberto Rimini und Tullio Weber entwickelt – ‚GRW‘ (die allerdings den mathematischen Formalismus modifiziert und somit, streng genommen, keine reine Interpretation der Quantenmechanik ist). Wenn sich eine dieser Kollapstheorien als angemessen herausstellen sollte, hätten wir es mit einer Verletzung von S-Det zu tun. Es wäre davon auszugehen, dass die aktuelle Welt indeterministisch wäre.

Andere Interpretationen der Quantenmechanik erlauben aber, dass eine Quantenwelt sehr wohl deterministisch sein kann. Laut der Bohm’schen Mechanik beschreibt die Wellenfunktion den Zustand von Systemen nicht vollständig. Es gibt verborgene Parameter, deren Entwicklung ebenfalls durch ein zusätzliches deterministisches Gesetz beschrieben wird. Die Uneindeutigkeit unserer Vorhersagen ergibt sich, laut der Theorie, dann daraus, dass wir einige dieser Parameter nicht kennen, und nicht aus einem Indeterminismus der Welt.

Viele-Welten-Theorien behalten bei, dass die Wellenfunktion den Zustand der Welt vollständig repräsentiert. Sie erklären die Uneindeutigkeit in unseren Vorhersagen, indem sie annehmen, dass Messungen in der Quantenmechanik keine eindeutigen Resultate haben. In Fällen, in denen durch die Wellenfunktion und die Schrödingergleichung nicht eindeutig festgelegt ist, ob

ein System in Zustand-1 oder in Zustand-2 gemessen werden wird, findet eine ‚Verzweigung der Realität‘ statt: In einem Zweig der Realität ist das System in Zustand-1, in einem anderen in Zustand-2. Wie sich die Welt als Ganzes entwickelt, ist damit vollkommen determiniert: Beide Messungen finden statt. In jedem Zweig der Realität wird der jeweilige Physiker aber nur eine Messung beobachten (vgl. Wallace 2012 für Details, wie man die Redeweise von ‚Zweigen‘ der Realität interpretieren soll). Sollte sich eine Verborgene-Parameter- oder Viele-Welten-Theorie als angemessen herausstellen, wäre die Quantenmechanik nicht weniger deterministisch als die klassische Mechanik.

Relativitätstheorien: Die Frage, ob und, gegebenenfalls, unter welchen Zusatzbedingungen die Relativitätstheorien deterministisch sind, kann hier aus Platzgründen nicht behandelt werden (unterschiedlich ausführliche Darstellungen findet man in Earman 2007 und Hoefer 2015). Es sei nur erwähnt, dass für die Relativitätstheorien die Definition des Determinismus modifiziert werden muss. Unsere bisherigen Definitionen T-Det und S-Det setzen eine absolute Gleichzeitigkeit voraus (z. B. wenn es um die Spezifizierung des Zustands der Welt zu einem bestimmten Zeitpunkt geht) – ein Begriff, der in den Relativitätstheorien problematisch wird. Es lassen sich aber in der speziellen Relativitätstheorie sogenannte ‚Cauchyflächen‘ definieren (vgl. Earman 1986, 59–60), in Bezug auf die deterministische und indeterministische Verläufe von Systemen oder Welten unterschieden werden können.

In der allgemeinen Relativitätstheorie können wir nicht mehr davon ausgehen, dass sich Systeme vor dem Hintergrund einer fix gegebenen Raumzeit entwickeln. Die Raumzeit entwickelt sich vielmehr selbst in Abhängigkeit von der Masse und Energieverteilung. Es zeigt sich, dass sich die für den Determinismus relevante Frage, ob bestimmte Bewegungsgleichungen eindeutige Verläufe bei gegebenem Anfangswert haben, nur für bestimmte Modelle der Einsteingleichungen formulieren lässt (vgl. Earman 2007 und Kiefer 2003).

21.5 Was bedeutet das für die Willensfreiheitsdebatte?

Die relevante Frage für die Willensfreiheit ist nun, ob unsere Entscheidungen und Handlungen durch die Gesetze und Zustände der Welt determiniert sind. Dies wäre der Fall, wenn die Naturgesetze, welche unsere Welt vollständig beschreiben, deterministisch sind. Aber selbst wenn T-Det für unsere Gesetze falsch ist, könnte es immer noch sein, dass S-Det erfüllt und unsere Welt deterministisch ist.

Und selbst wenn S-Det falsch ist, könnten, wenn auch nicht die Welt als Ganzes, zumindest unsere Entscheidungen und Handlungen determiniert sein. Wir können uns eine Welt vorstellen, deren Gesetze so sind, dass der Anfangszustand der Welt S_0 die nachfolgenden Zustände S_p, \dots, S_i nicht eindeutig festlegt. Die Gesetze würden auch eine Welt zulassen, die ebenfalls in Zustand S_0 beginnt, aber danach in den Zuständen S_j^*, \dots, S_i^* ist. Nehmen wir nun aber an, dass die zwei verschiedenen Abfolgen von Zuständen (S_p, \dots, S_i und S_j^*, \dots, S_i^*) sich vollkommen darin gleichen, wie Akteurinnen handeln und entscheiden. Die Unterschiede zwischen den Sequenzen betreffen nur die Eigenschaften von einigen mikroskopischen Teilchen. Somit sind in dieser Welt, auch wenn sie nicht deterministisch ist, alle menschlichen Handlungen immer noch eindeutig durch den Anfangszustand der Welt und die Gesetze festgelegt. Wenn also eine deterministische Welt eine Herausforderung für die Willensfreiheit darstellt, dann würde das eine solche Welt genauso tun.

Wie sich im vorangegangenen Abschnitt gezeigt hat, ist es erstaunlich schwierig, für einzelne Theorien zu einem Urteil darüber zu gelangen, ob sie deterministisch sind. Für die Willensfreiheitsdebatte wäre entscheidend, ob eine grundlegende Theorie, die die Quantenmechanik und die Allgemeine Relativitätstheorie vereinigt, deterministisch oder indeterministisch ist. Nur von einer solchen allgemeinen Theorie ist zu erwarten, dass sie unsere Welt vollständig

charakterisieren kann. Eine allgemein akzeptierte Theorie, die dies leistet, gibt es aber noch nicht.

Sollte eine solche Theorie indeterministisch sein, müssten die Modelle der Theorie, die dafür verantwortlich sind, genauer betrachtet werden. Handelt es sich bei diesen Beispielen um Fälle wie die Nortonkuppel, bei denen wir gute Gründe haben, anzunehmen, dass sie in unserer Welt nicht realisiert sind, dann trägt der Indeterminismus der fraglichen Theorie nichts zur Willensfreiheitsdebatte bei. Anders ist es, wenn der Indeterminismus von der Art ist, wie wir ihn den Kollapsinterpretationen zufolge in der Quantenmechanik finden. Dann wäre es zumindest einigermaßen plausibel, dass die Welt indeterministisch ist, und man müsste genauer anschauen, ob nicht-determinierte Ereignisse in Willensbildungsprozessen und Handlungen eine Rolle spielen könnten.

Worin aber genau besteht nun die Herausforderung für die Willensfreiheit durch den Determinismus? Die meisten Menschen fühlen zumindest ein leichtes Unbehagen bei dem Gedanken an den Determinismus. Wenn alle unsere zukünftigen Entscheidungen und Handlungen schon durch den Zustand der Welt in der Vergangenheit und die Naturgesetze festgelegt sind, sind wir dann nicht wie Roboter, die stur so funktionieren, wie sie programmiert wurden, oder wie Marionetten, die durch unsichtbare Fäden gesteuert werden? Wenn dies der Fall ist, wie können wir dann noch frei sein? Und wie können wir dann je für unsere Handlungen verantwortlich sein?

Bei genauerer Betrachtung scheint aber klar, dass die Unfreiheit des Willens nicht aus dem Determinismus allein folgen kann. Hier ist es hilfreich, sich vor Augen zu führen, dass die These des Determinismus für sich allein keine kausale oder anderweitige Erzwingung beinhaltet. Sie besagt lediglich, dass logisch aus vorherigen (oder nachfolgenden) Zuständen der Welt und den Naturgesetzen abgeleitet werden kann, wie wir in der Zukunft handeln. Es ist aber unklar, wie die bloße Tatsache, dass

aus wahren Sätzen über Zustände der Welt und Naturgesetze ableitbar ist, wie wir in der Zukunft handeln werden, zeigen soll, dass wir nicht frei sind. Wie gesagt, beinhalten alle ernstzunehmenden deterministischen Theorien auch, dass die Zukunft die Vergangenheit und die Gegenwart determiniert. Die Wenigsten aber finden diese Tatsache bedrohlich für die Willensfreiheit. Was also ist anders, wenn die Vergangenheit die Zukunft determiniert?

Wenn der Determinismus tatsächlich unsere Handlungsfreiheit bedroht, dann muss das mit weiteren Annahmen zu tun haben. Eine zentrale Frage ist somit, welche Zusatzannahmen man benötigt, damit der Determinismus die Willensfreiheit bedroht, und wie plausibel diese Annahmen sind. Eine Art und Weise, solche zusätzlichen Annahmen explizit zu machen, ist das einflussreiche *Konsequenzargument* (s. Kap. 22–23 sowie Hüttemann/Loew 2019).

Literatur

- Butterfield, Jeremy: Determinism and Indeterminism (2005). In: Routledge Encyclopedia of Philosophy <https://www.rep.routledge.com/articles/thematic/determinism-and-indeterminism/v-2> (8.12.2020).
- Earman, John: A Primer on Determinism. Dordrecht 1986.
- Earman, John: Aspects of Determinism in Modern Physics. In: Jeremy Butterfield, John Earman (Hg.): Philosophy of Physics. Amsterdam 2007, 1369–1434.
- Fletcher, Samuel: What Counts as a Newtonian System? The View from Norton's Dome. In: European Journal for Philosophy of Science 2 (2012), 275–297.
- Hofer, Carl: Causal Determinism. In: Edward N. Zalta (Hg.): The Stanford Encyclopedia of Philosophy (Spring 2016 Edition). Stanford. <https://plato.stanford.edu/archives/spr2016/entries/determinism-causal/> (8.12.2020).
- Hüttemann, Andreas: Ursachen. Berlin 2018.
- Hüttemann, Andreas/Loew, Christian: Freier Wille und Naturgesetze – Überlegungen zum Konsequenzargument. In: Klaus von Stoch, Saskia Wendel, Martin Breul u.a. (Hg.): Streit um die Freiheit – Philosophische und Theologische Perspektiven. Paderborn 2019, 77–93.
- Kiefer, Claus: Determinism in Classical and Quantum Gravity. In: Andreas Hüttemann (Hg.): Determinism in Physics and Biology. Paderborn 2003, 38–49.
- Kožnjak, Boris: Who Let the Demon Out? Laplace and Boscovich on Determinism. In: Studies in History and Philosophy of Science Part A 51 (2015), 42–52.
- Laplace, Pierre Simon de: Philosophischer Versuch über die Wahrscheinlichkeit [1819]. Hg. von Richard von Mises. Leipzig 1932.
- Norton, John: A Quantum Mechanical Supertask. In: Foundations of Physics 29 (1999), 1265–1302.
- Norton, John: The Dome: An Unexpectedly Simple Failure of Determinism. In: Philosophy of Science 75 (2008), 786–798.
- Strien, Marij van: The Norton-Dome and the 19th-Century Foundations of Determinism. In: Journal for General Philosophy of Science 45 (2014), 167–185.
- Suppes, Patrick: The Transcendental Character of Determinism. In: Midwest Studies in Philosophy 18 (1993), 242–257.
- Wallace, David: The Emergent Multiverse: Quantum Theory According To The Everett Interpretation. Oxford 2012.
- Werndl, Charlotte: Are Deterministic Descriptions and Indeterministic Descriptions Observationally Equivalent? In: Studies in History and Philosophy of Modern Physics 40 (2009), 232–242.
- Werndl, Charlotte: On Choosing between Deterministic and Indeterministic Models: Underdetermination and Indirect Evidence. In: Synthese 190 (2013), 2243–2265.
- Werndl, Charlotte: Determinism and Indeterminism. In: Paul Humphreys (Hg.): Oxford Handbook of Philosophy of Science. Oxford 2016, 210–232.
- Winnie, John: Deterministic Chaos and the Nature of Chance. In: John Earman, John Norton (Hg.): The Cosmos of Science – Essays of Exploration. Pittsburgh 1997, 299–324.
- Wüthrich, Christian: Can the World be Shown to be Indeterministic After All? In: Claus Beisbart, Stephan Hartmann (Hg.): Probabilities in Physics. Oxford 2011, 365–389.