

Determinismus – eine empirische These¹

In some German-language contributions to the debate on free will, it is assumed or claimed that determinism is not an empirically verifiable thesis. Peter Bieri, for example, thinks that one must presuppose determinism in order to understand the world as a conceivable world. Determinism would then not be an empirical thesis, but rather a condition without which the conceivability of the world cannot be thought (Bieri 2001, 15/16). Geert Keil writes that determinism “can neither be verified nor falsified experimentally and therefore determinism [is] a metaphysical thesis, not a scientific one” (Keil 2018, 58).

In contrast to these two claims, I will argue that determinism is most usefully conceived as an empirical thesis whose verification faces many difficulties. These difficulties, however, are not fundamentally different from those faced by other empirical theses.

1 Einleitung

In einigen deutschsprachigen Beiträgen zur Willensfreiheitsdebatte wird zuweilen unterstellt oder behauptet, der Determinismus sei keine empirisch überprüfbare These. So meint Peter Bieri, man müsse den Determinismus voraussetzen, um die Welt als eine verstehbare zu begreifen. Der Determinismus wäre dann keine empirische These, sondern eine Bedingung, ohne die die Verstehbarkeit der Welt nicht gedacht werden kann (Bieri 2001, 15/16). Geert Keil schreibt, der Determinismus ließe „sich experimentell weder verifizieren noch falsifizieren und deshalb [sei der] Determinismus eine metaphysische These, keine wissenschaftliche“ (Keil 2018, 58).²

¹ Dieser Aufsatz entstand im Kontext der von der DFG geförderten Forschungsgruppe zur Induktiven Metaphysik (FOR 2495, Projekt HU 843-12). Ich bedanke mich bei den Mitgliedern der Forschungsgruppe, sowie den Teilnehmern und Teilnehmerinnen an meinem Kölner Kolloquium, insbesondere bei Kian Salimkhani und Anastasja Petrovic für hilfreiche Kommentare. Christian Loew danke ich dafür, dass ich Teile eines gemeinsamen Aufsatzes übernehmen darf.

² Diese Unterstellung oder Behauptung mag es auch in anderssprachigen Beiträgen

Im Gegensatz zu diesen beiden Behauptungen werde ich die These vertreten, dass der Determinismus am sinnvollsten als eine empirische These aufgefasst wird, deren Überprüfung sich vielen Schwierigkeiten ausgesetzt sieht. Diese Schwierigkeiten unterscheiden sich aber nicht grundsätzlich von solchen, mit denen auch andere empirische Thesen zu tun haben.

Der Aufsatz ist wie folgt aufgebaut: Da der Ausdruck „Determinismus“ ein *terminus technicus* ist, dessen Definition zunächst in unser Belieben gestellt ist, werde ich als erstes für bestimmte Kriterien werben, die eine solche Definition erfüllen sollte, um dann eine Determinismusdefinition vorzuschlagen, die diese Kriterien besonders gut erfüllt (Abschnitt 2). Anschließend werde ich diskutieren, wie man eine daran anschließende Determinismusthese empirisch überprüfen kann (Abschnitt 3) und werde mich insbesondere mit einer Reihe von möglichen Einwänden auseinandersetzen (Abschnitt 4).

2 Definitionen

2.1 *Deterministisches Chaos*

Der Ausdruck „Determinismus“ ist anders als der thematisch etwas Verwandte bezeichnende Ausdruck „Ursache“ nicht in der Alltagssprache verankert. Es ist daher wenig aussichtsreich, bei einer Definition von einem geteilten Alltagsverständnis oder semantischen Intuitionen auszugehen. Auch ein Blick auf die Geschichte der Verwendungsweise dieses Ausdrucks ist wenig hilfreich. Erstens ist diese Geschichte erstaunlich kurz und zweitens sind die Verwendungsweisen erstaunlich unterschiedlich (vgl. dazu Hacking 1983). Das erste Vorkommen des Ausdrucks in einem philosophischen Buchtitel findet sich wohl in Christian Wilhelms Snells 1789 erschienenen Abhandlung *Über Determinismus und moralische Freiheit*. Dort versteht Snell unter Determinismus das Prinzip des zureichenden Grundes, angewandt auf die Zustände der Seele.³ Kant,

zur Willensfreiheitsdebatte geben, in diesem Aufsatz werde ich mich aber hauptsächlich auf die genannten Beiträge beschränken.

³ Snell: „Determinismus, d. i. Anwendung des Prinzips vom zureichenden Grunde und der hieraus folgenden hypothetischen Nothwendigkeit aller Weltveränderungen auf unsere Seelenwirkungen.“ (Snell 1789, 15)

der möglicherweise auf Snell Bezug nimmt, charakterisiert in *Die Religion innerhalb der Grenzen der bloßen Vernunft* (1793) Determinismus als die These „der Bestimmung der Willkür durch innere hinreichende Gründe“.⁴ Der französische Mathematiker Joseph Boussinesq wiederum, der eine Reihe von Schriften mit Titeln wie „Sur la conciliation de la liberté morale avec le déterminisme scientifique“ verfasst hat, definiert den Determinismus auf die Gesetze der klassischen Mechanik Bezug nehmend wie folgt:

Dieses große Gesetz ist der Ausdruck des mechanischen Determinismus [...]. Es gibt für jeden Augenblick, als Funktion des gegenwärtigen statischen Zustandes, die zweite Ableitung desselben Zustandes nach der Zeit, und nur auf diese beschränkte Weise verbindet es die Zukunft mit der Gegenwart und der Vergangenheit. (Boussinesq 1879, 46).

Diese unterschiedlichen Vorschläge (eine Liste divergierender Definitionen ließe sich problemlos bis in die Gegenwart fortsetzen – vgl. dazu auch die Zitate in Abschnitt 2.3) werfen die Frage auf, wie der Ausdruck „Determinismus“ heute verstanden werden sollte. Insbesondere hängt die Frage, ob der Determinismus eine empirisch überprüfbare These ist, davon ab, welche Determinismusdefinition vorausgesetzt wird.

Es kann (vor dem Hintergrund der unterschiedlichen Verwendungsweisen) im Folgenden also nicht darum gehen, eine *deskriptive* Definition zu geben, d. h. den tatsächlichen Sprachgebrauch bezüglich des Ausdrucks „Determinismus“ so genau wie möglich abzubilden, noch darum, eine beliebige Definition zu *stipulieren*. Vielmehr sollte versucht werden, eine sinnvolle, reformierende Definition anzugeben, d. h. den Begriff – mit Carnap zu reden – zu *explizieren*. Aber was heißt hier sinnvoll? Carnap hat für reformierende Definitionen oder Explikationen eine Reihe von Anforderungen aufgestellt: Der explizierte Begriff (das explicatum) sollte so bestimmt werden, dass er an Einfachheit und Präzision gewinnt, er sollte in den relevanten wissenschaftlichen Kontexten fruchtbar sein, insbesondere sollte er aber auch dem zu explizierenden Begriff (dem explicandum) ähneln (Carnap 1950, 7).

⁴ Kant: „Die, welche diese unerforschliche Eigenschaft als ganz begreiflich vorstellen, machen durch das Wort Determinismus (dem Satze der Bestimmung der Willkür durch innere hinreichende Gründe) ein Blendwerk, gleich als ob die Schwierigkeit darin bestände, diesen mit der Freiheit zu vereinigen, woran doch niemand denkt, ...“ 1793, (Fußnote: A 54, Darmstadt Band IV, S. 701).

Carnaps Kriterium der Ähnlichkeit wirft vor dem Hintergrund der disparaten Verständnisse von Determinismus Schwierigkeiten auf. Anstelle der Ähnlichkeit mit vorgefundenen Verständnissen von „Determinismus“ schlage ich vor, die Forderung treten zu lassen, dass der explizierte Begriff eine ganz bestimmte argumentative Rolle spielen sollte. Innerhalb der Willensfreiheitsdebatte wird der Determinismus als eine Herausforderung für freies und verantwortliches Handeln aufgefasst. Wenn wir uns also im Kontext der Willensfreiheitsdebatte befinden, so die Forderung, sollte eine Determinismusdefinition eine Grundlage dafür schaffen, zu verstehen, dass und wie der Determinismus eine echte Herausforderung für die Willensfreiheit sein kann. Was heißt das genau?

2.2 *Adäquatheitsbedingungen für Determinismusdefinitionen*

Spätestens seit Augustinus und Boethius beschäftigt sich die Philosophie mit der Frage, ob freies und verantwortliches Handeln damit vereinbar ist, dass es Faktoren, wie das Vorherwissen und die Vorsehung Gottes gibt, die wir einerseits nicht beeinflussen können, die aber andererseits unser Handeln derart festzulegen scheinen, dass uns keine anderen Handlungsoptionen als die tatsächlich durchgeführten bleiben. Seit der Frühen Neuzeit entwickelt sich die Vorstellung, dass alles Geschehen unter Naturgesetze fällt und damit eine neue Herausforderung: die Frage, ob unser Handeln durch Naturgesetze (und Anfangsbedingungen), auf die wir keinen Einfluss nehmen können, derart festgelegt sind, dass wir keine andere als die festgelegte Handlungsoption haben. Dies ist die Herausforderung des naturgesetzlichen Determinismus für die Willensfreiheit, die allein im Folgenden behandelt wird.

Mir geht es hier nicht darum, Optionen zu benennen, wie man mit diesem Problem umgehen kann, sondern darum, den Kontext zu skizzieren, innerhalb dessen mit dem Ausdruck „Determinismus“ eine bestimmte Herausforderung artikuliert wird. Als eine wesentliche Anforderung für eine Explikation des Begriffs Determinismus hatte ich vorgeschlagen, dass eine solche Artikulation möglich sein muss.

Konkret bedeutet diese Forderung,

- (i) dass die Definition/das explicatum erkennbar machen muss, dass hier tatsächlich eine Herausforderung für die Willensfreiheit vorliegt (diese Forderung hat auch Helen Steward kürzlich erhoben (Steward

2021) und umgekehrt, dass die Herausforderung verschwindet, wenn der Indeterminismus (die Negation des Determinismus) wahr ist.

- (2) Darüber hinaus bedeutet die Forderung, dass die Definition/ das explicatum erkennbar machen muss, dass die Quelle dieser Herausforderung die Naturgesetze bzw. Theorien der Naturwissenschaften insbesondere der Physik sind (diese Forderung hat Butterfield (1998) erhoben).

Die Adäquatheitsbedingungen (1) und (2) werden die wesentlichen Anforderungen an Determinismusdefinitionen sein, die ich im Folgenden (neben den von Carnap genannten Forderungen nach Präzision u.ä.) diskutieren werde.

2.3 *Wie man Determinismus nicht definieren sollte*

Vor dem Hintergrund der genannten Anforderungen lassen sich nun einige einflussreiche Definitionsvorschläge – zumindest für den Kontext der Willensfreiheitsdebatte – als unzureichend zurückweisen.

2.3.1 Vorhersagbarkeit

Popper versteht unter Determinismus

„die These, dass die Struktur der Welt so beschaffen ist, dass jedes Ereignis mit einem beliebigen Präzisionsgrad rational vorhergesagt werden kann, wenn man eine hinreichend genaue Beschreibung vergangener Ereignisse sowie alle Naturgesetze erhält.“ (Popper 1982, 1/2)

Diese Definition von Determinismus genügt nicht der Adäquatheitsbedingung (1). Aus (1) ergibt sich, dass wenn der Indeterminismus wahr sein sollte, dann auch die durch die Naturgesetze generierte Herausforderung nicht mehr bestehen sollte. Eine Konsequenz der Popperschen Definition ist insbesondere, dass die Welt auch dann indeterministisch ist, wenn sich ihr Verhalten nicht beliebig genau vorhersagen lässt. Das ist aber verträglich damit, dass die ursprüngliche Herausforderung besteht. Nur deshalb, weil niemand wissen kann, welche Faktoren mein Verhalten festlegen, ist ja nicht ausgeschlossen, dass es Faktoren sind, auf die ich keinen Einfluss habe. (Die hier geschilderte Option wird durch Theorien des deterministischen Chaos illustriert (vgl. dazu Earman 2007, 1388–1391.)) Eine Explikation, die sich auf den Vorhersagebegriff stützt, genügt daher der Adäquatheitsbedingung (1) nicht.

2.3.2 Kausalität

Häufig wurde oder wird der Determinismus mit dem so genannten Kausalgesetz oder -prinzip in Verbindung gebracht.

Determinismus heißt die Lehre von der Determination (Bestimmtheit, Bedingtheit) des Handelns und Wollens durch äußere und innere Ursachen (Motive), im engeren Sinne die Anschauung, daß es eine (absolute) Willensfreiheit nicht gebe, weil das Wollen wie alles andere Geschehen dem Kausalgesetze unterworfen sei. (Eisler 1904)

„die Annahme eines allgemeinen Kausalprinzips (Kausalität), dem zufolge alles Geschehen Wirkung einer vorlaufenden Gesamtgeschichte ist (kausaler D)“ (Sandkühler 2010, 383)

Was auch immer man genau unter „Kausalgesetz“ oder „Kausalprinzip“ verstehen mag, man wird auf die Begriffe Ursache und Wirkung zurückgreifen müssen, um sie zu erläutern. Das heißt aber letztlich, den Determinismusbegriff durch kausales Vokabular zu definieren. Earman kommentierte diesen Versuch wie folgt: „it seeks to define a vague concept – determinism – in terms of a truly obscure one – causation“ (Earman 1986, 5). Diese Einschätzung muss man nicht mehr teilen, denn sowohl die kontrafaktische Theorie der Kausalität wie auch der Interventionismus (um nur zwei Ansätze zu nennen) haben in den letzten Jahrzehnten dazu beigetragen, ein gutes Verständnis davon zu gewinnen, was Ursachen sein können und unter welchen Bedingungen Kausalbeziehungen vorliegen. Allerdings gelingt diese Klärung vor allem für Alltagskontexte und makroskopische Theorien, wie z. B. im Kontext der Sozialwissenschaften. Die Frage, ob Kausalbegriffe sinnvoll im Kontext fundamentaler Theorien der Physik angewendet werden können, ist dagegen sehr umstritten.⁵ Insbesondere im Kontext von so genannten Verschränkungen und dem EPR-Paradoxon in der Quantenmechanik wird diskutiert, ob die Annahmen, die typischerweise mit Kausalbegriffen assoziiert werden, auf quantenmechanische Systeme zutreffen.⁶

⁵ Vgl. dazu z. B. Falkenburg 2012, 276–282. Anders als Falkenburg bin ich allerdings der Meinung, dass eine Definition von Determinismus nicht auf den Kausalbegriff angewiesen ist, und dass deshalb eine Kritik am Kausalbegriff nicht zugleich eine Kritik am Determinismusbegriff sein muss.

⁶ Diese Kontroverse wird z. B. in Näger & Stöckler 2015 aufgearbeitet.

Das Adäquatheitskriterium, das Definitionen, die sich auf kausale Terminologie stützen, verletzen, ist also nicht zwangsläufig das der Präzision (wie Earman's Formulierung nahe legt), sondern die oben genannte Anforderung (2), dass eine Determinismusdefinition deutlich machen muss, wie die Naturgesetze oder Theorien die Quelle der Herausforderung für die Willensfreiheit sein können. Der Begriff der Ursache vermag dies nicht zu leisten.

2.4 Theoriendeterminismus⁷

Adäquatheitsbedingung (2) fordert, dass eine Determinismusdefinition erkennbar machen sollte, dass die Herausforderung für die Willensfreiheit von Naturgesetzen oder Theorien herrührt, unter die alles Geschehen (einschließlich des menschlichen Verhaltens) fällt. Eine solche Definition muss mit Begriffen operieren, die an Naturgesetze oder Theorien anschließen können.

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

Seit der frühen Neuzeit, insbesondere seit Newton, wird das Verhalten von physikalischen Systemen durch ihren Zustand und durch dynamische Bewegungsgleichungen, die die zeitliche Veränderung dieser Zustände charakterisieren, beschrieben. Der Zustand Z_S eines Systems zu einem Zeitpunkt lässt sich dabei als die Gesamtheit jener Merkmale des Systems zu diesem Zeitpunkt charakterisieren, die zu einer vollständigen Charakterisierung des Systems zu diesem Zeitpunkt erforderlich sind. In der Physik und in der Wissenschaftstheorie wird der Begriff des Zustands fast immer anhand von Beispielen eingeführt.⁸ So ist der Zustand eines Systems der klassischen Mechanik durch Ort und Impuls

⁷ Abschnitte 2.4. und 2.5 stellen eine Überarbeitung von Abschnitten aus Loew & Hüttemann (2022) dar.

⁸ Eine Ausnahme bildet Mittelstaedt: „Die in der Gesamtheit $A_1, A_2 \dots$ aller möglichen Messwerte enthaltenen Kennzeichnung des Objekts wollen wir dessen Zustand nennen.“ (Mittelstaedt 1981, 100).

gegeben. Damit ist gemeint, dass andere Größen, die zu einer vollständigen Charakterisierung des Systems gehören, wie z. B. die kinetische Energie durch Ort und Impuls festgelegt sind. In der Thermodynamik ist der Zustand eines Systems durch Größen wie Druck, Temperatur etc. gegeben, durch die mittels makroskopischer Zustandsgleichungen weitere Größen bestimmt werden können. Es sei noch erwähnt, dass in der Physik der Begriff des Zustands manchmal auch in einem engeren Sinne verwendet wird, so dass er nur Eigenschaften umfasst, die sich über die Zeit hinweg verändern. Dieser engere Begriff ist aber im gegenwärtigen Kontext nicht relevant.⁹

Von dem Zustand_S, in dem sich ein reales physikalisches System befindet, möchte ich den Zustand_T unterscheiden, den eine Theorie einem System zuschreibt. Falls wir es mit einer „theory of everything“ zu tun haben, die alle Systeme vollständig beschreibt, fallen diese beiden Zustandsbegriffe zusammen. In anderen Fällen ist das aber nicht so. Die Thermodynamik, beispielsweise, interessiert sich für die mikrophysikalischen Zustände von Gasen nicht, obwohl sie zu einer vollständigen Charakterisierung eines Systems dazu gehören würden. Hier fallen also Zustand_S und Zustand_T auseinander.

Was als Zustand_T eines Systems gilt, ist zunächst relativ zu einem bestimmten Gesetz oder einer Theorie zu verstehen. Es handelt sich um all jene Eigenschaften eines Systems zu einem bestimmten Zeitpunkt, 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. Für die zeitliche Entwicklung bzw. die Bewegungsgleichungen eines Fadenpendels müssen Ort und Impuls gegeben sein, die Farbe des Pendels ist irrelevant. Im Falle thermodynamischer Systeme sind die genauen Mikrozustände irrelevant. Da also die Zustände_T nicht notwendigerweise eine vollständige Charakterisierung realer physikalischer Systeme geben, können sie sich von den Zuständen_S unterscheiden.

Diese Charakterisierung der Zustände_T (oder auch der Zustände_S) ist verträglich damit, dass sich in manchen Fällen aus dem Lösen der Bewegungsgleichungen mit Hilfe 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 Ver-

⁹ Zu einigen Schwierigkeiten, die mit dem Zustandsbegriff verbunden sind, siehe Earman 1986, 14–16 oder Hofer 2016, Abschnitt 2.2.

halten 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. (Der Begriff des vollständigen Zustands schließt also nicht schon *per definitionem* indeterministische Systeme aus.)

Welche Eigenschaften des Systems relevant sind, um die entsprechenden Bewegungsgleichungen lösen zu können, ist je nach Theorie unterschiedlich und gewissermaßen Teil der jeweiligen Hypothese. Der Zustand_T eines Masseteilchens in der Klassischen Mechanik umfasst wie bereits erwähnt seine Masse, seinen Ort, und Geschwindigkeit (oder Ort und Impuls). Die Newtonschen Bewegungsgleichungen erlauben uns dann – bei gegebener Masse –, von dem Ort und der Geschwindigkeit eines isolierten Masseteilchens zu einer Zeit seinen Ort und seine Geschwindigkeit zu anderen Zeiten 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_T werden hier also relativ zu diesen Theorien verstanden und können je nach Theorie unterschiedliche Eigenschaften umfassen.

Mit Hilfe des Begriffs eines Zustands_T können wir nun fragen, 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 werden wir im nächsten Kapitel noch genauer eingehen). Unter „Theoriendeterminismus“ soll im weiteren Verlauf Folgendes verstanden werden:

Theoriendeterminismus: Eine Theorie oder ein Naturgesetz ist deterministisch_T, genau dann, wenn für alle (aktualen oder bloß möglichen) Systeme, auf die die Theorie oder das Naturgesetz zutrifft, gilt: Wenn zwei dieser Systeme zu einem Zeitpunkt hinsichtlich ihres Zustands_T übereinstimmen, dann stimmen sie zu allen Zeitpunkten hinsichtlich ihrer Zustände_T überein. (Vgl. Butterfield 2005.)

Jede Theorie trifft auf eine Vielzahl tatsächlicher oder bloß möglicher Systeme zu. Die Newtonsche 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 Um-

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

In welchem Sinne ist hier von „Festlegung“ die Rede? Man könnte glauben, dass wenn ein Zustand eines Systems andere Zustände im Sinne des Determinismus festlegt, es sich dabei um eine besondere Art von Erzwingung oder Hervorbringung eines Zustands durch einen anderen handelt. Was genau die metaphysische Relation zwischen den relevanten Zuständen ist, wird durch die obige Definition aber offen gelassen. Alles, was die Definition besagt ist, dass aus einer Beschreibung des Systems zu einem Zeitpunkt und der deterministischen Theorie *logisch folgt*, welche Zustände das System zu allen anderen Zeitpunkten einnimmt. 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, gelten – sie muss 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 Zustand 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 insbesondere unabhängig davon, ob man Naturgesetze (zum Beispiel) als bloße Generalisierungen wie in der an Hume anschließenden Tradition, im Armstrongschen Sinne als Instantiierungen einer Erzwingungsrelation oder im Sinne des dispositionalen Essentialismus als in dispositionalen Eigenschaften gegründet, auffasst. Der modale Status von Naturgesetzen ist demnach für die Frage, ob ein Gesetz deterministisch ist, irrelevant. (Dieser Fall ist

analog zu der Frage, ob Gesetze zeitsymmetrisch sind. Auch die Antwort auf diese Frage hängt allein vom Inhalt und nicht vom modalen Status von Naturgesetzen ab.)

2.5 Systemdeterminismus

Der Theoriendeterminismus, so wie er in 2.4 definiert wurde, ist eine Eigenschaft von Theorien (oder Naturgesetzen). Häufig – insbesondere im Kontext der Willensfreiheitsdebatte – interessieren wir uns aber dafür, ob ein bestimmtes System und insbesondere die Welt als Ganzes deterministisch ist, also für Determinismus als eine Eigenschaft von Systemen. Butterfield (2005) hat davor gewarnt, umstandslos vom Determinismus von Theorien auf einen Determinismus von Systemen zu schließen. Gleichwohl lässt sich ein Zusammenhang herstellen.

John Earman hat in seiner einflussreichen Monographie *Determinismus als eine Eigenschaft von Systemen (oder Welten)* definiert (vgl. Earman 1986, 13). Daran knüpfe ich an, und stütze mich nun auf den Begriff des Zustands_S:

Systemdeterminismus: Eine Welt w ist deterministisch_S, genau dann, wenn jede Welt mit den gleichen Gesetzen wie w , die mit w zu einem Zeitpunkt hinsichtlich ihres Zustands_S übereinstimmt, mit w zu allen Zeitpunkten hinsichtlich ihres Zustands_S übereinstimmt.

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 (ihr Zustand_S), 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 hinsichtlich ihrer Zustände_S übereinstimmen, aber nicht zu einem späteren (oder früheren) Zeitpunkt.

Theoriendeterminismus und Systemdeterminismus, das wurde schon angedeutet, sind nicht äquivalent. Erstens kann es sein, dass eine Theorie deterministisch_T ist (der Theoriendeterminismus ist erfüllt) aber ein von dieser Theorie beschriebenes System den Systemdeterminismus nicht erfüllt, also indeterministisch_S ist. Ein solcher Fall kann eintreten, wenn eine deterministische Theorie zwar auf ein System zutrifft, es aber *nicht*

vollständig beschreibt (Zustand_T und Zustand_S stimmen nicht überein). Angenommen, es gilt das Gesetz der Energieerhaltung. Dieses Gesetz ist deterministisch_T, denn für jedes System, das unter dieses Gesetz fällt gilt, dass wenn zwei Systeme zu einem Zeitpunkt bezüglich ihrer Energie übereinstimmen, sie dann zu allen Zeitpunkten hinsichtlich dieser Größe übereinstimmen. Aber daraus folgt nicht, dass eine Welt, auf die dieses Gesetz zutrifft, deterministisch im Sinne des Systemdeterminismus ist. Selbst wenn die Energie von Systemen sich deterministisch entwickelt, muss dies nicht für andere Eigenschaften der Systeme der Fall sein.

Zweitens kann es deterministische_S Systeme geben, ohne dass die auf sie zutreffenden Gesetze oder Theorien deterministisch_T sind. Für diese Überlegung ist unerheblich, dass Zustand_T und Zustand_S auseinanderfallen können. (Deshalb lasse ich diese Unterscheidung hier außen vor.) Der Grund ist vielmehr, dass im Rahmen des Theoriendeterminismus für deterministische Gesetze/Theorien gefordert wird, dass für *jedes System*, auf das die Gesetze/Theorien zutreffen, *jeder mögliche* Zustand dieses Systems die Zustände des Systems zu allen anderen Zeitpunkten eindeutig festlegt. Wenn wir uns aber für die Frage interessieren, ob *unsere* Welt oder ein anderes bestimmtes System deterministisch im Sinne des Systemdeterminismus ist, dann fragen wir uns nur, ob jeder *tatsächliche* Zustand *dieses* Systems oder unserer Welt die Zustände zu allen anderen Zeitpunkten eindeutig festlegt. Theoriendeterminismus und Systemdeterminismus unterscheiden sich also nicht nur hinsichtlich des Zustandsbegriffs, sondern auch im Blick auf den Kreis der Systeme, für die eindeutige zeitliche Entwicklungen gefordert werden.

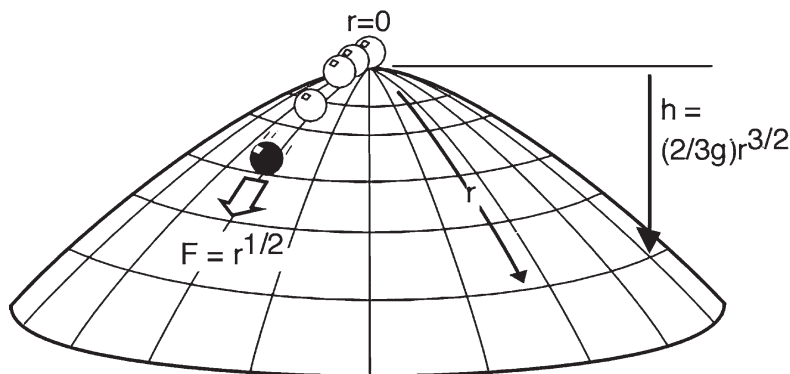
Dies kann durch den in letzter Zeit viel diskutierten Fall der Nortonkuppel illustriert werden.¹⁰

Angenommen wird eine Kuppel, deren Oberfläche eine ganz spezielle Form besitzt, nämlich eine solche, 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,

¹⁰ John D. Norton: The Dome: A Simple Violation of Determinism in Newtonian Mechanics, <https://sites.pitt.edu/~jdnorton/Goodies/Dome> [zuletzt abgerufen am 27. 9. 2022].



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, so dass $r=0$ 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 hinunterzurutschen.

Lösung 1 lautet also $r(t)=0$ 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.

Der Theoriendeterminismus 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 gibt Fletcher (2012)). Eine wesentliche Frage ist, was wir aus diesem Beispiel 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. [...] 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 der Theoriendeterminismus für die klassische oder Newton'sche Mechanik nicht gilt. Dies würde aber selbst in dem Fall, in dem sich unsere Welt vollständig durch die Newton'sche Mechanik charakterisieren ließe, nicht bedeuten, dass für unsere Welt der Systemdeterminismus nicht gälte, denn es könnte sein, dass die Anfangsbedingungen, die bei der Nortonkuppel relevant sind, in unserer Welt niemals realisiert sind oder sogar nicht realisiert sein können. Es könnte z. B. sein, dass die Kraftfunktion, die Norton einführt, (aus welchen Gründen auch immer) in unserer Welt nicht realisiert ist (oder vielleicht sogar nicht realisiert werden kann). Der problematische Zustand_T der mittels der Nortonkuppel beschrieben würde, wäre dann kein Zustand_S, in dem sich unsere Welt jemals befände. Aus dem Theorienindeterminismus folgt also nicht, dass alle Systeme, die unter die Theorie fallen, indeterministisch_S sind.

Kurzum: Ohne weitere Zusatzannahmen impliziert weder der Systemdeterminismus den Theoriendeterminismus, noch der Theoriendeterminismus den Systemdeterminismus. Gleichwohl lässt sich spezifizieren, welche Art von Zusatzannahmen erforderlich sind.

Theoriendeterminismus und Systemdeterminismus sind Definitionen und als solche keine Behauptungen, die wahr oder falsch sein können. Aber gestützt auf diese Definitionen lässt sich die im Kontext der Willensfreiheitsdebatte relevante These des Determinismus wie folgt charakterisieren:

Determinismus: Unsere Welt ist systemdeterministisch.

2.6 Logische Folgebeziehung oder metaphysischer Zwang?

Zum Abschluss dieser Überlegungen dazu, wie man die These des Determinismus am sinnvollsten formuliert, möchte ich mich noch mit einem kürzlich formulierten Einwand von Helen Steward (2021) auseinandersetzen. Sie kritisiert Definitionen wie die des Theoriendeterminismus und des Systemdeterminismus, weil sie der oben formulierten Adäquatheitsbedingung (1) nicht genügen.

Steward unterscheidet den „entailment“-Determinismus

(ED) For any given time, a complete statement of the [nonrelational] facts about that time, together with a complete statement of the laws of nature, entails every truth as to what happens after that time.

der den Begriff des logischen Folgerns in den Mittelpunkt stellt, von dem, was sie „metaphysischen Determinismus“ nennt:

(MD): For any given time, the total set of [non-relational] facts about that time, causally or physically or naturally necessitates every fact about what happens after that time.

Der wesentliche Punkt ist, dass in dieser zweiten Definition anstatt von logischer Folgerung davon die Rede ist, dass bestimmte Tatsachen spätere auf irgendeine Weise *erzwingen*. Steward meint, dass allein eine solche modale Formulierung die Herausforderung, die der Determinismus darstelle, erkennbar mache. Weil beim entailment-Determinismus von einem Zwang nicht die Rede ist, sei ja offensichtlich, dass (ED) mit freiem Willen kompatibel sei. Dieser Einwand betrifft auch den Theorien- und den Systemdeterminismus, wie er hier definiert wurde, denn auch in diesen Definitionen wird lediglich eine logische Folgerungsbeziehung unterstellt, die genaue metaphysische Beziehung zwischen den unterschiedlichen Zuständen aber offen gelassen (vgl. Abschnitt 2.4).

Stewards Argumentation scheint mir nicht überzeugend zu sein. Zwar ist ihr zuzustimmen, dass, um die Herausforderung des Determinismus zu artikulieren, modale Begriffe, die über logische Folgerung hinausgehen, erforderlich sind. Das bedeutet aber nicht, dass der Determinismus selbst durch derartige modale Begriffe definiert werden muss. Die Herausforderung des Determinismus besteht darin, dass der Determinismus dann, *wenn sehr plausible weitere Annahmen wahr sind*,

unser Entscheiden und Handeln unabänderlich macht und in diesem Sinne erzwingt. Die geforderte Modalität wird durch die Zusatzannahmen beschrieben, nicht durch den Determinismus selbst. Es ist gerade ein Vorteil von (ED), diese unterschiedlichen Annahmen unterscheidbar machen zu können.

Genau daran knüpft das Konsequenzargument an. Wenn man die *prima facie* sehr plausiblen Annahmen, dass wir weder an der Vergangenheit noch an den Naturgesetzen etwas ändern können (das sind modale Thesen), akzeptiert, dann führt der Determinismus (im Sinne von (ED)) dazu, dass unser gegenwärtiges und zukünftiges Handeln unabänderlich feststeht.

Der Vorteil einer Definition wie (ED) besteht gerade darin, die Herausforderung analysieren zu können und verschiedene Aspekte der Herausforderung (die in den Prämissen des Konsequenzarguments aufgelistet werden) einzeln benennen zu können.¹¹

Halten wir also fest: Definitionen, wie die des Theoriendeterminismus und des Systemdeterminismus, die sich auf den Begriff des logischen Folgerns stützen und keine Begriffe ins Spiel bringen, die irgendeinen metaphysischen Zwang beschreiben, ermöglichen sehr wohl die Herausforderung des Determinismus für die Willensfreiheit zu artikulieren, wenn – wie im Konsequenzargument – auf modale Zusatzannahmen zurückgegriffen wird.

3. Empirische Überprüfbarkeit

Im Folgenden werde ich für die These argumentieren, dass der Determinismus – und folglich auch seine Negation, der Indeterminismus – eine empirisch überprüfbare These ist. Behauptungen, dass der Determinismus deshalb nicht überprüfbar sei, weil er trivialerweise wahr sei, weil wir gar nicht anders können, als ihn für wahr zu halten oder aber deshalb, weil es sich um eine transzendente oder metaphysische Frage handle, und ähnliche Thesen werde ich als nicht gut begründet zurückweisen.

¹¹ Stewards Sorge besteht darin, dass man dann, wenn man Naturgesetze humanisch im Sinne von Regularitätstheorien versteht, der Herausforderung für die Willensfreiheit, die im Konsequenzargument formuliert wird, mit Leichtigkeit entgehen kann. In Hüttemann 2022 wird gezeigt, dass dieser Ausweg zwar grundsätzlich besteht, die argumentativen Folgelasten diese Lösung aber wenig attraktiv machen.

Natürlich ist die empirische Überprüfung des Determinismus keine einfache Angelegenheit, aber das ist die empirische Überprüfung von wissenschaftlichen Hypothesen selten. Bei der Überprüfung des Determinismus treten aber keine grundsätzlich anderen Herausforderungen auf als in anderen Fällen.

Weder werde ich allerdings behaupten, dass eine solche Überprüfung erfolgreich schon stattgefunden hat, noch dass sie erfolgreich schon jetzt stattfinden könnte.

Uns interessiert, ob unsere Welt deterministisch ist. Es sei daher noch einmal an die Definition aus Abschnitt 2 erinnert:

Systemdeterminismus: Eine Welt w ist deterministisch, genau dann, wenn jede Welt mit den gleichen Gesetzen wie w , die mit w zu einem Zeitpunkt übereinstimmt, mit w zu allen Zeitpunkten übereinstimmt.

Entscheidend ist, ob diejenige Theorie, die unsere Welt vollständig beschreibt, für Zustände unserer Welt, nur eindeutige zeitliche Verläufe zulässt. Ob eine gegebene Theorie deterministisch ist, ist eine Frage des Theoriendeterminismus:

Theoriendeterminismus: 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.

Um überprüfen zu können, ob unsere Welt als Ganzes deterministisch ist, benötigen wir eine Theorie, die die Welt *vollständig* beschreibt. Wenn die fragliche Theorie die Welt nicht vollständig beschrieb, also etwas ausließ, dann bliebe selbst bei einem Theoriendeterminismus der fraglichen Theorie unbestimmt, wie sich das nicht berücksichtigte etwas verhalten würde. Die fragliche Theorie muss also eine allumfassende Theorie sein, eine „theory of everything“. Das bedeutet nicht nur, dass sie z. B. alle physikalischen Grundkräfte umfassen muss, sondern auch, dass jedes Detail auf makroskopischer Ebene unter diese Theorie fällt oder zumindest im Prinzip durch sie festgelegt ist. Ein Substanzdualismus, wie Descartes ihn sich vorgestellt hat, oder ein Emergentismus, der auf der emergenten Ebene kausale Fähigkeiten zulässt, die nicht unter phy-

sikalische Gesetze fallen (die nicht durch die Gesetze „fixiert“ sind), sind mit dieser Voraussetzung unvereinbar. Wenn in einem solchen Fall die physikalische Welt durch deterministische Gesetze beschrieben würde, dann wäre die Welt als Ganzes vielleicht gleichwohl indeterministisch, weil im mentalen Bereich verschiedene zeitliche Verläufe zulässig wären.

Der naturgesetzliche Determinismus, wenn er als Herausforderung für die Willensfreiheit verstanden werden soll, verlangt also, dass unsere Welt durch eine Theorie (bzw. Naturgesetze), die allumfassend ist, charakterisiert werden kann. Diese Forderung lässt sich durch einen Rückgriff auf frühere Formen des Determinismus plausibilisieren. Gottes Vorsehung ist nur dann ein Problem für die Willensfreiheit des Menschen, wenn die Vorsehung sich auch auf das bezieht, was Menschen tun. Wenn das menschliche Entscheiden und Tun von der göttlichen Vorsehung ausgenommen wäre, gäbe es keinen Konflikt mit der Willensfreiheit und wir müssten die Herausforderung des (theologischen) Determinismus gar nicht erst ernst nehmen. Ganz entsprechend ist die Situation im Falle des naturgesetzlichen Determinismus. Eine Spannung zur Willensfreiheit ergibt sich nur dann, wenn angenommen wird, dass die Naturgesetze auch auf das Verhalten von Menschen zutreffen.

Es muss nicht angenommen werden, dass eine solche Theorie in ihrem eigenen Vokabular alle makroskopischen Phänomene bis hin zur Ästhetik der 12-Ton Musik erklären kann, wohl aber, dass die allumfassende Theorie alle makroskopischen Phänomene, d. h. alle makroskopischen Verläufe *fixiert*. Alles, was geschieht, superveniert auf dem, was die allumfassende Theorie beschreibt. Insbesondere bedeutet das, dass gegeben eine *theory of everything*, Zustand_T und Zustand_S zusammenfallen.

Der Determinismus, so wie wir ihn definiert haben, kann nur wahr sein, wenn es Gesetze oder eine allumfassende Theorie gibt, unter die alles Geschehen in der Welt fällt. Wenn es eine solche Theorie nicht gibt, ist *per definitionem* der (naturgesetzliche) Indeterminismus wahr. Die Voraussetzung für die Wahrheit des Determinismus ist allerdings nur, dass es eine solche Theorie oder solche Naturgesetze *gibt*, nicht das wir sie auch kennen.

Wollen wir allerdings überprüfen, ob der Determinismus wahr ist, dann müssen wir überprüfen, ob eine solche *theory of everything* auf unsere Welt zutrifft, und ob diese deterministisch ist.

Die empirische Überprüfung des Determinismus bzw. des Indeterminismus erfordert die folgenden Schritte:

- 1.) Eine empirische Fragestellung: Trifft eine allumfassende Theorie auf unsere Welt zu?
- 2.) Falls eine solche Theorie gefunden wurde: Ist diese Theorie deterministisch? Das ist eine Frage des logischen Folgens.
- 3.) Falls die Theorie indeterministisch ist, d. h. die Theorie Welten zulässt, derart, dass sie zu einem Zeitpunkt bezüglich ihres Zustandes übereinstimmen, zu anderen aber nicht, ist zu fragen, ob wir gute Gründe haben, anzunehmen, dass unsere Welt eine dieser Welten ist.

Wie in Abschnitt 2 bereits erwähnt, impliziert der Theoriendeterminismus für solche Welten, die durch die Theorie vollständig beschrieben werden, den Systemdeterminismus. Wenn eine solche Theorie allerdings indeterministisch ist, folgt der Systemindeterminismus für unsere Welt nur dann, wenn die nicht-eindeutigen Lösungen (Welten) „physikalische Lösungen“ sind. Damit ist Folgendes gemeint. Bewegungsgleichungen lassen oft Lösungen zu, die auf der Grundlage von induktiv gestützten Zusatzannahmen als physikalisch unplausibel ausgeschlossen werden können. Solche Lösungen (Welten) sind dann zwar mathematisch möglich, aber „unphysikalisch“. Ein Beispiel sind die Maxwell-Gleichungen, die mathematisch sowohl so genannte „avancierte“ als auch so genannte „retardierte“ Lösungen zulassen. Diese entsprechen einlaufenden und auslaufenden elektromagnetischen Wellen. Erstere werden als unphysikalisch verworfen, weil sie, so die übliche Formulierung, bestimmten Kausalannahmen widersprechen (vgl. Frisch 2014, Kap. 7 für eine Diskussion dieser Strategie). Wichtig ist, dass solche Zusatzannahmen, mittels derer bestimmte Lösungen (Welten) als unphysikalisch ausgeschlossen werden, selbst empirisch gestützt sind (das gilt auch für die soeben erwähnten Kausalannahmen). Ein anderes Beispiel für eine mathematisch mögliche, aber unphysikalische Lösung hatten wir bei der Diskussion der Nortonkuppel kennengelernt.

Kurzum, für die Frage, ob bestimmte Systeme oder Welten deterministisch sind, spielen auch Zusatzannahmen eine Rolle. Das unterscheidet die Überprüfung des Determinismus aber nicht von der Überprüfung anderer empirischer Hypothesen.

4. Einwände

Manche Autoren behaupten das Gegenteil dessen, wofür ich bisher argumentiert habe:

„Der Determinismus ist keine wissenschaftliche Theorie über einen bestimmten Gegenstandsbereich, sondern eine empirisch nicht überprüfbare These über den Weltverlauf als Ganzes.“ (Keil 2018, 63)

Was könnte für eine solche Behauptung sprechen? Ich werde zwei Überlegungen näher betrachten.

- 1) Der Determinismus kann deshalb keine empirische These sein, weil er eine Präsupposition für unser Verständnis der Welt ist.
- 2) Der Determinismus kann deshalb keine empirische These sein, weil eine solche Überprüfung unüberwindbaren Hindernissen ausgesetzt wäre.

4.1 *Determinismus als Präsupposition*

Peter Bieri's Buch *Das Handwerk der Freiheit* beginnt mit einem Argument, das zeigen soll, dass wir eine Welt, in der der Determinismus nicht gilt, nicht denken können:

„Unsere Idee der Welt ist die Idee einer verständlichen Welt. Es ist die Idee einer Welt, in der wir verstehen können, *warum* etwas geschieht. Zwar gibt es darin vieles, was wir nicht verstehen, und vermutlich wird das immer so bleiben. Trotzdem denken wir, ist die Welt eine Gesamtheit von Phänomenen, in die wir Licht bringen können, indem wir uns erklären, warum die Phänomene so sind wie sie sind. Selbst wenn dieser Gedanke eine Täuschung wäre: Anders können wir nicht über die Welt denken. ...

Der Gedanke, dass eine verständliche Welt eine Welt ist, in der es Bedingungen und Gesetze gibt, die festlegen, wann was geschieht, hat eine wichtige Konsequenz: Die Vergangenheit legt in einer solchen Welt eine einzige, eindeutig bestimmte Zukunft fest.“ (Bieri 2001, 15/16)

Bieri präsentiert uns hier so etwas wie ein transzendentes Argument für die These, dass eine Welt gar nicht anders als als eine deterministische

begriffen werden kann. Wäre das der Fall, wäre es natürlich müßig, nach empirischen Belegen für den Determinismus oder den Indeterminismus zu suchen.

Aber warum sollte man Bieris Argument akzeptieren? Wir erklären Phänomene mithilfe probabilistischer Gesetze, die keine eindeutige bestimmte Zukunft erfordern. Die Physiker und Physikerinnen, die sich davon überzeugt hatten, dass die Quantenmechanik indeterministisch sei, haben keineswegs aufgehört, die Welt erklären zu wollen. Es mag durchaus so sein, dass sich – etwa – mittels transzendentaler Argumente Bedingungen für die Verständlichkeit der Welt angeben lassen, aber der Determinismus ist sicherlich keine solche Bedingung. Das legt zumindest die Geschichte der Physik nahe.

4.2 Hindernisse für die empirische Überprüfung des Determinismus bzw. Indeterminismus

Geert Keil hält den Determinismus für eine „spekulative Doktrin“ (Keil 2018, 133). Ich werde eine Reihe von Überlegungen anführen, die sich mit Hindernissen für die empirische Überprüfbarkeit auseinandersetzen (einige davon gehen auf Keil zurück).

Hindernis 1:

Der Determinismus setzt voraus, dass es zeitliche Verlaufsgesetze gibt. Die fundamentalen Gesetze der Physik, so Keil, sind aber keine zeitlichen Verlaufsgesetze:

„Die fundamentalen Naturgesetze, auf deren Entdeckung die Physiker mit Recht stolz sind, sind aber überhaupt keine Sukzessionsgesetze über Ereignisse, sondern Koexistenzgesetze über Universalien, Erhaltungssätze, Aussagen über Kräftegleichgewichte und Symmetriengesetze.“ (Keil 2018, 56).

Diese Behauptung scheint mir schlicht unzutreffend zu sein. Das zweite Newtonsche Gesetz, die Maxwell'schen Gleichungen, die Schrödingergleichung sind allesamt erstens fundamentale Gesetze bzw. Gleichungen innerhalb der jeweiligen Theorien und zweitens sind es Differentialgleichungen, in denen Ableitungen nach der Zeit vorkommen und erlauben daher, zeitliche Verläufe der Zustände von Systemen zu beschreiben. Insofern handelt es sich um Verlaufsgesetze. Wenn es derartige zeitliche

Verlaufsgesetze nicht gäbe, wäre die Physik auch gar nicht in der Lage, das Verhalten von Systemen vorauszuberechnen und vorherzusagen.

Hindernis 2:

Wir benötigen eine Theorie, die die Welt als Ganzes beschreibt. Alle unsere empirischen Belege sind jedoch Belege für das Verhalten von (kleinen) Teilen der Welt. Selbst wenn sich das Verhalten *dieser* Systeme mit Hilfe deterministischer (oder indeterministischer) Theorien beschreiben lässt, stellt sich die Frage, ob wir auf die Welt als Ganzes extrapolieren dürfen.

Wie dieses Problem gelöst werden kann, möchte ich anhand des Beispiels der Quantenmechanik erläutern.

Entscheidend ist, dass wir empirische Belege für zwei unterschiedliche Arten von Gesetzen haben. Erstens gibt es für eine große Zahl unterschiedlicher Systeme Belege dafür, dass sich ihr Verhalten mittels der Schrödingergleichung beschreiben lässt – im Grunde für alle Systeme, von denen wir hinreichend genaue Kenntnis haben, um Kräfte etc. zu bestimmen. (Die Schrödingergleichung selbst ist so etwas wie ein zeitliches Verlaufsschema, das zu präzisen empirischen Vorhersagen nur dann führt, wenn man Annahmen über die wirkenden Kräfte/Potentiale und über Anfangszustände macht (die natürlich ihrerseits empirisch gestützt sein sollten).) All diese Belege betreffen Teilsysteme des Universums. Das zweite, das wir haben, sind Zusammensetzungsgesetze. Diese Gesetze erlauben uns, wenn wir das Verhalten zweier Teilsysteme kennen, das Verhalten des zusammengesetzten Systems zu beschreiben. Es zeigt sich, dass wir erfolgreich vorhersagen können, wie sich zusammengesetzte Systeme verhalten werden, wenn wir die Teilsysteme und die möglichen Wechselwirkungen derselben kennen und deshalb gibt es auch für diese Zusammensetzungsgesetze unzählige Belege. Die empirischen Belege erlauben uns – wie das in anderen Fällen auch üblich ist – induktiv zu schließen, dass diese Zusammensetzungsgesetze allgemein gelten, d. h. für beliebig komplexe quantenmechanische Teilsysteme. Entscheidend ist also, dass wir nicht nur empirische Belege dafür haben, dass sich alle möglichen Systeme in der Welt gemäß der Schrödingergleichung verhalten, sondern auch dafür, wie sich mittels empirisch ebenfalls getesteter Zusammensetzungsgesetze Beschreibungen für zusammengesetzte Systeme, auch für die Welt als Ganzes generieren lassen, die dann ebenfalls der Schrödingergleichung genügen.

Im Blick auf die Überprüfung des Determinismus oder des Indeterminismus bedeutet das, dass wir empirische Belege für den Determinismus (oder für den Indeterminismus) sammeln können, weil aus den Zusammensetzungsgesetzen und den Verlaufsgesetzen, die wir an Teilen des Universums überprüfen, folgt, welche Gleichungen für das Universum als Ganzes gelten.

Hindernis 3:

„Um den Determinismus auf den Prüfstand zu stellen, müsste man das Universum zweimal in exakt denselben Zustand versetzen können. Solange man dies nicht kann, lässt sich das unterschiedliche Verhalten eines Systems bei der Wiederholung eines Experiments stets den minimal unterschiedlichen Anfangs- oder Randbedingungen zuschreiben. Die Welt ist eben nur einmal da und besitzt keine Neustarttaste.“ (Keil 2018, 57/8)

Antwort: Zunächst einmal sei zugegeben, dass nichts dafürspricht, dass wir die Fähigkeit besitzen, das Universum zweimal in denselben Zustand zu versetzen. Das liegt u. a. daran, dass es *grundsätzlich* ausgeschlossen zu sein scheint, jemals irgendein System in ganz genau denselben Zustand zu versetzen. Wiederholungen von Experimenten scheinen daher ausgeschlossen zu sein. Diese Art von Replikationsproblem betrifft empirische Überprüfungen ganz grundsätzlich und ist daher kein spezifisches Problem der Überprüfung des Determinismus. Da ich lediglich zeigen möchte, dass bei der Überprüfung des Determinismus keine grundsätzlich neuartigen Probleme auftauchen, kann ich die Frage, wie dieses Problem in den Naturwissenschaften praktisch gelöst wird, außen vorlassen.

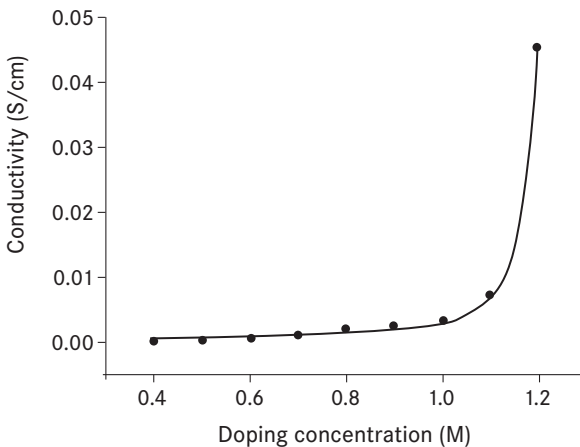
Zuzugeben ist weiterhin, dass den Zustand des Universums experimentell fixieren zu wollen vermutlich zu größeren praktischen Schwierigkeiten führen würde im Vergleich zu Versuchen der experimentellen Festlegung der Zustände vieler Teilsysteme des Universums.

Trotz dieses Zugeständnisses gilt aber auch: Das Universum zweimal in exakt denselben Zustand zu versetzen, ist weder eine hinreichende noch eine notwendige Bedingung der Überprüfung des Determinismus. Angenommen ich hätte es mit einer Münze zu tun und fragte mich, ob das Verhalten derselben deterministisch oder genuin indeterministisch ist. Wenn nun die Münze zweimal unter exakt denselben Bedingungen Kopf anzeigt, ist für die Frage, ob das System deterministisch ist, noch nicht viel gewonnen. (Wenn sich allerdings in sehr vielen Fällen niemals

Zahl zeigen würde, wäre das etwas anderes und wenn sich – unter exakt denselben Bedingungen – einmal Kopf und einmal Zahl ergäbe, wäre dies hinreichende Evidenz für den Indeterminismus.)

Für die Betrachtung des Hindernisses wesentlicher ist aber, dass das mehrmalige Versetzen des Universums in ein und denselben Zustand auch nicht notwendig ist, um den Determinismus empirisch zu überprüfen, denn wir können gute empirische Belege für das Bestehen von Sachverhalten haben, für die wir keine *direkten* empirischen Belege haben.

Das Hindernis-3-Argument setzt voraus, dass sich die Bestätigung auf die Werte eines Gesetzes beschränkt, die experimentell (oder auf andere Weise) realisiert wurden. Das ist aber in der wissenschaftlichen Praxis nicht der Fall, wie der folgende (beliebige) Fall illustriert.



Die eingezeichneten Werte sind Belege für einen funktionalen Zusammenhang zwischen zwei im Blick auf unsere Diskussion beliebige Größen (elektrische Leitfähigkeit eines Materials und einer bestimmten Konzentration von so genannten Dotierungen in diesem Material). Dieser Zusammenhang gilt nun nicht nur für die tatsächlich gemessenen Werte, sondern auch für die Werte zwischen den eigentlichen Messwerten. Die experimentellen Daten für die Konzentrationen 0,4; 0,5; 0,6; usw. sind nicht nur Belege dafür, dass der funktionale Zusammenhang an genau diesen Stellen besteht, sondern auch dafür, dass er z. B. an der Stelle 0,55 oder 1,03 besteht. Es sind also Belege für den funktionalen Zusammenhang als Ganzen.

Es kann darüber hinaus auch (hinreichend gute) empirische Belege für Vorgänge oder Sachverhalte geben kann, die experimentell nicht nur nicht realisiert, sondern sogar nicht realisierbar sind. Folgendes Beispiel, das Salviati, der üblicherweise Galileis Position vertritt, in dessen *Unterredungen* vorträgt, mag dies verdeutlichen:

Wir sahen, dass die Differenz der Geschwindigkeiten verschiedener Körper von verschiedenem (spezifischen) Gewicht im allgemeinen größer war in den stärker widerstehenden Medien: aber im Quecksilber sinkt Gold nicht nur schneller als Blei, sondern Gold allein sinkt überhaupt, während alle anderen Metalle und Steine emporsteigen und schwimmen; andererseits aber fallen Gold, Blei, Kupfer, Porphyr und andere schwere Körper mit fast unmerklicher Verschiedenheit in der Luft; Gold von 100 Ellen Höhe kaum 4 Fingerbreit früher als Kupfer: angesichts dessen glaube ich, dass, wenn man den Widerstand der Luft ganz aufhobe, alle Körper ganz gleich schnell fallen würden. (Galilei 1987, 344)

Es wird hier für die These argumentiert, dass Körper im Vakuum – unabhängig von ihrer spezifischen Dichte – gleich schnell fallen. Ein Vakuum lässt sich zwar nicht realisieren, aber aufgrund der vorliegenden Belege, wonach die Geschwindigkeitsdifferenz der unterschiedlich schweren Körper abnimmt, je weniger dicht das Medium ist, in dem sie fallen, lässt sich auf das Verhalten der Körper im Vakuum extrapolieren.

Auch im Falle der Überprüfung des Determinismus ist eine solche Extrapolation möglich, wie ich sie oben schon beschrieben habe: Wenn empirisch gut belegt ist, dass die Systeme, die wir für gewöhnlich untersuchen, deterministischen (oder indeterministischen) Verlaufsgesetzen genügen, und wir darüber hinaus empirische Belege für die Gültigkeit von Zusammensetzungsgesetzen haben, die uns zu charakterisieren erlauben, wie sich zusammengesetzte Systeme verhalten, wenn man das Verhalten der Teile kennt, dann können wir auch auf die Verlaufsgesetze schließen, die das Universum als Ganzes charakterisieren selbst dann wenn wir niemals des Zustand des Universums festlegen oder auch nur kennen können. Wenn die Differentialgleichungen, mittels derer diese Verlaufsgesetze den Gang des Universums beschreiben, nur eindeutige Lösungen des Anfangswertproblems zulassen, dann dürfen wir schließen, dass sich das Universum, wenn es zweimal in demselben Anfangszustand wäre, exakt auf dieselbe Weise weiterentwickeln würde.

Hindernis 4:

Es gibt ein Argument, das unabhängig von dem Inhalt der Gesetze (oder der Theorie) – gestützt allein auf die Form der Gesetze – zu zeigen scheint, dass der Indeterminismus wahr ist. Damit der Determinismus wahr ist, so das Argument, müssen die zeitlichen Verlaufsgesetze ausnahmslos gelten. Naturgesetze sind aber typischerweise *ceteris paribus*-Gesetze (Keil 2018, 55, Steward 2021 diskutiert diesen Einwand ebenfalls, ohne sich ihn aber zu eigen zu machen). Wenn die fundamentalen Verlaufsgesetze nur *ceteris paribus* gelten, dann gelten sie nicht universell und können insbesondere keinen eindeutigen Verlauf unserer Welt repräsentieren. („Der Grund dafür ist schnell genannt: Es kann jederzeit passieren, dass just in dem Moment, wo das A-Ereignis eingetreten ist und das B-Ereignis folgen müsste, etwas dazwischen kommt.“ (Keil 2018, 55)) Selbst dann, wenn der Inhalt eines solchen Gesetzes deterministisch wäre (also mit bestimmten Anfangsbedingungen nur ein zeitlicher Verlauf der weiteren Zustände kompatibel wäre), wäre gleichwohl kein Grund gegeben, den Determinismus für wahr zu halten. Denn das, was das Gesetz sagt, gilt ja nur, falls nichts dazwischen kommt – es sind so genannte *exklusive ceteris paribus*-Gesetze.¹² Für den Fall, dass die Bedingung der Abwesenheit von Störfaktoren nicht erfüllt sind, macht das Gesetz keine Aussage. Insbesondere lässt sich dann nicht behaupten, dass die Verläufe der Systeme eindeutig festgelegt sind, denn was passiert, wenn etwas dazwischen kommt, bleibt offen. Der Indeterminismus wäre wahr. Eine weitere empirische Prüfung wäre nicht notwendig.

Die These, dass es *ceteris paribus*-Gesetze sogar „all the way down“, also in allen wissenschaftlichen Bereichen, auch in der Physik gibt, halte ich für gut begründet (vgl. Hüttemann 2014). Ein Beispiel ist das erste Newtonsche Gesetz:

„Jeder Körper verharrt in seinem Zustand der Ruhe oder der gleichförmig-geradlinigen Bewegung, sofern er nicht durch eingedrückte Kräfte zur Änderung seines Zustands gezwungen wird.“ (Newton 1988, S. 53).

Das erste Newtonsche Gesetz macht eine Aussage über die zeitliche Entwicklung eines Systems, unter der Bedingung, dass es keine externen Kräfte gibt. Das Gesetz lässt offen, was passiert, wenn externe Kräfte

¹² Für diese Terminologie siehe Schurz 2002

wirken. Wenn aber offenbleibt, was in Zukunft passiert, liegt kein Determinismus vor, selbst wenn für all jene Fälle, in denen die fraglichen Bedingungen erfüllt sind, ein eindeutiger Verlauf vorhergesagt wird.

Dem Hindernis-4-Einwand ist entgegenzuhalten, dass aus dem Umstand, dass es *ceteris paribus*-Gesetze „all the way down“ gibt, nicht folgt, dass die fundamentalen Theorien indeterministisch sind. Das kann man sich am Beispiel der klassischen Mechanik deutlich machen.

Grundsätzlich impliziert das Zugeständnis, dass es auch in der Physik *ceteris paribus*-Gesetze gibt, nicht, dass *alle* Gesetze der Physik *ceteris paribus*-Gesetze sind. Insbesondere gibt es keinen erkennbaren Grund, diejenigen Gesetze, die ich oben schon als Beispiele für fundamentale Verlaufsgesetze angegeben habe, als *ceteris paribus*-Gesetze zu klassifizieren. Das zweite Newtonsche Gesetz (anders als das erste), die Schrödingergleichung, die Maxwellgleichungen, die Einsteingleichungen gelten allesamt ohne *ceteris paribus*-Vorbehalt (vgl. dazu auch Earman und Roberts 1999). Für den Fall der klassischen Mechanik bedeutet das konkret, dass mit dem Umstand, dass das erste Newtonsche Gesetz offen lässt, was passiert, wenn externe Kräfte wirken, verträglich ist, dass es ein weiteres Gesetz gibt (das zweite Newtonsche Gesetz), das genau beschreibt, was bei der Einwirkung derartiger Kräfte passiert.

Das erste Newtonsche Gesetz (wie andere exklusive *ceteris paribus*-Gesetze auch) lässt offen, was passiert, wenn es Störfaktoren (in diesem Fall sind das externe Kräfte) gibt. Ein solches Gesetz, eine solche Beschreibung setzt voraus, dass es etwas gibt, das in ihr nicht berücksichtigt wurde. Das zweite Newtonsche Gesetz angewandt auf die Welt als Ganzes verlangt nun aber, dass nichts ausgelassen wird, dass insbesondere alle wirkenden Kräfte berücksichtigt werden. Es gibt dann (anders als bei exklusiven *ceteris paribus* Gesetzen) zu einem Zeitpunkt t , der als Ausgangspunkt für die weitere Entwicklung des Systems herangezogen wird, keine externen Kräfte oder Störfaktoren. Die Anwendung des zweiten Newtonschen Gesetzes (gleiches gilt für die Schrödingergleichung) auf das Universum als Ganzes schließt aus, dass es zum Zeitpunkt t Faktoren gibt, die später als Störfaktoren wirken können – schließt also aus, dass es sich um ein im gewöhnlichen Sinne exklusives *ceteris paribus*-Gesetz handelt.

Es sei an dieser Stelle explizit darauf hingewiesen, dass mit der vorangegangenen Überlegung die so genannten „space invaders“, die gerade im Kontext der klassischen Mechanik viel diskutiert wurden, nicht aus-

geschlossen werden. *Space invaders* sind Störfaktoren, die *nach* dem von uns betrachteten Zeitpunkt t Teil des Universums werden. Ob solche *space invaders* möglich sind, hängt von der jeweiligen Theorie ab (vgl. dazu Earman 2008). Die Frage hängt demnach von dem *Inhalt* der Gesetze bzw. Theorien ab. Wir sind damit aber wieder bei der Frage, ob eine Theorie im Sinne des Theoriendeterminismus deterministisch ist. Der Einwand bezüglich der *ceteris paribus*-Vorbehalte betraf aber nicht den Inhalt der Gesetze oder Theorien, sondern ihre Form – genauer: ihre Qualifikation durch *ceteris paribus*-Vorbehalte.

Kurzum: Es mag – auch in der Physik – zahlreiche *ceteris paribus*-Gesetze geben. Das ist aber für unsere Fragestellung irrelevant, solange die fundamentalen Theorien, wie die z. B. die klassische Mechanik oder die Quantenmechanik, mit ihren jeweiligen Bewegungsgleichungen, angewandt auf den Gesamtzustand der Welt zu einem Zeitpunkt t , keine *ceteris paribus*-Vorbehalte benötigen.

Hindernis 5: Unterbestimmtheit

Patrick Suppes hat bestritten, dass die Frage, ob die Welt deterministisch ist, empirisch geklärt werden kann. „Deterministic metaphysicians can comfortably hold to their view knowing that they cannot be empirically refuted, but so can indeterministic ones as well.“ (Suppes 1993, 254).

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 grundsätzlicher empirischer Unterbestimmtheit seien. D. h., auch die Gesamtmenge aller empirischer Daten kann nicht eindeutig festlegen, ob die relevanten Systeme deterministisch oder indeterministisch sind. Es wäre dann nicht klar, ob wir empirisch herausfinden können, ob unsere Welt deterministisch ist.

Suppes' Argument wurde in der Folge kontrovers diskutiert (Werndl 2009, 2013 & 2016 Winnie 1997 und Wüthrich 2011). Die Diskussion hat ergeben, dass es Fälle von empirischer Unterbestimmtheit bestenfalls dann gibt, wenn man nicht alle empirischen Informationen über das 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 f)). Anders als von Suppes ursprünglich nahegelegt gibt es keine guten Gründe anzunehmen, dass das Problem der Unter-

bestimmtheit im Falle der Frage des Determinismus und des Indeterminismus eine grundsätzlich andere Rolle spielt, als in anderen Fällen konkurrierender empirischer Hypothesen.

5. Resümee

Ob unsere Welt deterministisch oder indeterministisch ist, lässt sich an den Theorien ablesen, die unsere Welt vollständig beschreiben. Ob eine dieser Theorien wahr ist, ist eine empirisch zu überprüfende Frage. Keiner der Einwände, die darauf abzielten, zu zeigen, dass eine solche empirische Überprüfung grundsätzlichen Schwierigkeiten ausgesetzt ist, die bei der Überprüfung anderer empirischer Hypothesen nicht auftreten, konnte überzeugen. Entscheidend ist also, zunächst empirisch zu klären, was die *theory of everything* ist, um dann zu überprüfen, ob diese Theorie für physikalisch plausible Bedingungen nur eindeutige zeitliche Verläufe zulässt oder nicht. Da es eine solche *theory of everything* gegenwärtig nicht gibt, bleibt uns im Blick auf die Frage, ob der Determinismus oder der Indeterminismus wahr ist, nichts anderes als abzuwarten.

Literatur

- Bieri, Pete 2001: *Das Handwerk der Freiheit*, Hanser.
- Boussinesq, J. 1879: *Conciliation du véritable déterminisme mécanique avec l'existence de la vie et de la liberté morale*, in: *Mémoires de la société des sciences, de l'agriculture et des arts de Lille*, 6(4), 1–257.
- Butterfield, Jeremy 2020: *Determinism and Indeterminism* (2005), in: *Routledge Encyclopedia of Philosophy* <https://www.rep.routledge.com/articles/thematic/determinism-and-indeterminism/v-2> (8.12.2020).
- Carnap, Rudolf 1950: *Logical Foundations of Probability*, Chicago.
- Earman, John 1986: *A Primer on Determinism*, Dordrecht.
- Earman, John 2007: *Aspects of Determinism in Modern Physics*, in: Jeremy Butterfield, John Earman (Hg.): *Philosophy of Physics*. Amsterdam, 1369–1434.
- Earman, John 2008: *How Determinism Can Fail in Physics and How Quantum Physics Can (Sometimes) Provide a Cure*, in: *Philosophy of Science* 75, 817–829.
- Earman, John und Roberts, John 1999: *Ceteris Paribus, There is no Problem of Provisos*, in: *Synthese*, 118, 439–78.

- Eisler, Rudolf 2022: *Wörterbuch der philosophischen Begriffe* 1904; Artikel Determinismus online abgerufen: <https://www.textlog.de/3861.html>, (11.1.2022).
- Falkenburg, Brigitte 2012: *Mythos Determinismus*, Berlin.
- Fletcher, Samuel 2012: *What Counts as a Newtonian System? The View from Norton's Dome*, in: *European Journal for Philosophy of Science* 2, 275–297.
- Frisch, Mathias 2014: *Causal Reasoning in Physics*, Cambridge.
- Galilei, Galileo 1987: *Schriften, Briefe, Dokumente*, Band 1, München.
- Hacking, Ian 1983: *Nineteenth Century Cracks in the Concept of Determinism*, in: *Journal of the History of Ideas* 44, 455–475.
- Hofer, Carl 2016: *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 2014: *Ceteris paribus laws in Physics*, in: *Erkenntnis* 79, 1715–1728.
- Hüttemann, Andreas 2022: *The Problem of Radical Freedom – How Different Conceptions of Laws Affect our Accounts of Moral Practice*, in: Anna Marmodoro, Christopher Austin & Andrea Roselli (Hrsg.) *Time, Law and Free Will*, Dordrecht, 185–198.
- Kant, Immanuel: *Die Religion innerhalb der Grenzen der bloßen Vernunft*, in: *Werke Band IV*, Darmstadt.
- Keil, Geert 2018: *Willensfreiheit und Determinismus*, Ditzingen.
- Loew, Christian & Hüttemann, Andreas 2022: *Determinismus*, in: Vera Hoffmann-Kolss und Nicole Rathgeb (Hrsg.) *Handbuch Philosophie des Geistes*, Stuttgart.
- Mittelstaedt, Peter 1981: *Philosophische Probleme der modernen Physik*, Mannheim.
- Näger, Paul & Stöckler, Manfred 2015: *Verschränkung und Nichtlokalität: EPR, Bell und die Folgen*, in: Cord Friebe et al.: *Philosophie der Quantenmechanik*, Berlin, 113–176.
- Newton, Isaac 1988: *Philosophiae naturalis Principia mathematica. Mathematische Grundlagen der Naturphilosophie*, übersetzt und herausgegeben von Ed Dellian, Hamburg.
- Norton, John 2008: *The Dome: An Unexpectedly Simple Failure of Determinism*, in: *Philosophy of Science* 75, 786–798.
- Popper, Karl 1982: *The Open Universe*, London.
- Sandkühler, Hans Jörg (Hg.) 2010: *Enzyklopädie Philosophie*, 3 Bände, Hamburg.
- Schurz, Gerhard 2002: *Ceteris Paribus Laws: Classification and Deconstruction*, in: *Erkenntnis* 52, 351–372.

- Snell, Christian 1789: *Über Determinismus und moralische Freiheit*, Offenbach.
- Steward, Helen 2022: *Laws Loosened*, in: Anna Marmodoro, Christopher Austin & Andrea Roselli (Hrsg.) *Time, Law and Free Will*, Dordrecht, 161–184.
- Steward, Helen 2021: *What is Determinism? Why we Should Ditch the Entailment Definition*, in: Hausmann Marco & Noller Jörg (Hrsg.) *Free Will: Historical and Analytic Perspectives*, London, 17–43.
- Strien, Marij van 2014: *The Norton-Dome and the 19th-Century Foundations of Determinism*, in: *Journal for General Philosophy of Science* 45, 167–185.
- Suppes, Patrick 1993: *The Transcendental Character of Determinism*, in: *Midwest Studies in Philosophy* 18, 242–257.
- Werndl, Charlotte 2009: *Are Deterministic Descriptions and Indeterministic Descriptions Observationally Equivalent?*, in: *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 40, 232–242.
- Werndl, Charlotte 2013: *On Choosing between Deterministic and Indeterministic Models: Underdetermination and Indirect Evidence*, in: *Synthese* 190, 2243–2265.
- Werndl, Charlotte 2016: *Determinism and Indeterminism*, in: Paul Humphreys (Hg.): *Oxford Handbook of Philosophy of Science*, Oxford, 210–232.
- Winnie, John 1997: *Deterministic Chaos and the Nature of Chance*, in: John Earman, John Norton (Hg.): *The Cosmos of Science – Essays of Exploration*, Pittsburgh, 299–324.
- Wüthrich, Christian 2011: *Can the World be Shown to be Indeterministic After All?*, in: Claus Beisbart, Stephan Hartmann (Hg.): *Probabilities in Physics*, Oxford, 365–389.