

Westfälische Wilhelms-Universität Münster
Philosophisches Seminar

Determinismus bei klassischen physikalischen Theorien

Schriftliche Hausarbeit zur Ersten Staatsprüfung
für das Lehramt für die Sekundarstufe II
und für die Sekundarstufe I

Eingereicht von:
Jochen Apel
Bentelerstr. 64
48149 Münster
Matrikelnummer: 308912

Themensteller: Prof. Dr. Andreas Hüttemann

Inhalt

1.	Einleitung	S.3
2.	Wissenschaft - ein erfolgreiches Projekt	S.6
2.1	Kriterien für erfolgreiche wissenschaftliche Theorien	S.8
2.1.1	Erklärung und Determinismus	S.9
2.1.2	Ein Theorienideal der Physik?	S.11
2.1.2.1	Lokalität	S.11
2.1.2.2	Laplace-Determinismus	S.13
2.1.2.3	Newtonsche Gesetze	S.13
2.1.2.4	Konsistenz	S.13
2.1.2.5	Paradigma des einfachen Systems	S.14
2.2	Zusammenfassung	S.16
3.	Was ist Determinismus?	S.18
3.1	Ursache und Wirkung	S.18
3.2	Vorhersagbarkeit	S.20
3.3	Earmans Definition	S.23
3.3.1	Laplace-Determinismus	S.23
3.3.2	Der MRL-Account	S.27
3.4	Butterfields Definition	S.31
3.5	Zusammenfassung	S.34
4.	Klassische Mechanik	S.36
4.1	Newtonsche Raumzeit	S.37
4.2	Gravitierende Massen	S.38
4.3	Das Space Invaders-Argument	S.41
4.3.1	Space Escapers	S.41
4.3.2	Space Invaders	S.42
4.3.3	Was zeigt das Argument im Hinblick auf unsere Welt?	S.44
4.3.4	Was zeigt das Argument im Hinblick auf die klassische Mechanik?	S.46
4.3.4.1	Der Erhaltungssatz-Einwand	S.46
4.3.4.2	Earmans Reaktion	S.47
4.3.4.3	Was kann das Noether-Theorem leisten?	S.50
4.3.4.4	Synchronisierte Space Escapers und Invaders	S.51
4.4	Die Masse auf der Kuppel	S.52
4.5	Reversibilität und Determinismus	S.58
5.	Thermodynamik	S.63

6.	Elektrodynamik	S.65
7.	Zwischenstand	S.68
8.	Nichtlineare Physik und Chaos	S.73
8.1	Nichtlineare Physik – ein Beispiel: das Wetter	S.73
8.2	Ein Weg ins Chaos: die Dynamik einer Population nach Verhulst	S.74
	8.2.1 Die logistische Gleichung	S.74
	8.2.2 Die langfristige Entwicklung der Population	S.76
8.3	Kennzeichen nichtlinearer chaotischer Systeme	S.79
	8.3.1 Sensitive Abhängigkeit von den Anfangsbedingungen	S.79
	8.3.2 Einfache Komplexität	S.80
8.4	Determinismus und Chaos	S.82
9.	Exkurs in die nicht-klassische Physik	S.86
9.1	Relativitätstheorie	S.87
	9.1.1 Spezielle Relativitätstheorie	S.87
	9.1.2 Allgemeine Relativitätstheorie	S.89
9.2	Quantentheorie	S.92
9.3.	Zusammenfassung	S.98
10.	Determinismus als Eigenschaft unserer Welt	S.100
10.1	Das Theorie-Welt-Verhältnis	S.100
10.2	Ist die Rede vom Determinismus unserer Welt bedeutungslos?	S.102
11.	Determinismus als Theorietugend	S.107
11.1	Determinismus und Theorienideal	S.107
11.2	Determinismus und Vorhersage	S.109
11.3	Determinismus und Erklärung	S.109
12.	Schlussbemerkungen	S.112
13.	Literatur	S.115
14.	Abbildungsnachweise	S.120
15.	Erklärung	S.121

1. Einleitung

Der Titel dieser Arbeit lautet *Determinismus bei klassischen physikalischen Theorien*. Die Frage nach dem Determinismus spielt in der Philosophie seit ihren Anfängen eine bedeutende Rolle. Häufig steht dabei das Problem der Willensfreiheit im Fokus des Interesses. Es macht für unser Selbstverständnis als Menschen einen fundamentalen Unterschied, ob der Determinismus gilt und ob auch wir ihm unterworfen sind oder nicht. Dies ist allerdings nicht der Aspekt der Thematik, mit dem sich diese Arbeit auseinandersetzen wird. Vielmehr wird es hier um die eminente Bedeutung des Determinismus in den (Natur-)Wissenschaften und insbesondere in der Physik gehen. Von welcher Art genau diese Bedeutung ist, ist eine äußerst subtile Problematik, mit der ich mich in dieser Arbeit am Beispiel der klassischen Physik auseinandersetzen werde. Um diese Auseinandersetzung überhaupt erst möglich zu machen, muss man sich zunächst darüber klar werden, was der Ausdruck „Determinismus“ bedeutet. In einer ersten Annäherung¹ kann Determinismus verstanden werden, als eine Auffassung, gemäß der jedes Ereignis notwendig aus vorhergehenden Ereignissen und Bedingungen (inkl. der Naturgesetze) hervorgeht. Es liegt auf der Hand, dass es weit reichende Konsequenzen hat, ob unsere Welt in der beschriebenen Weise deterministisch ist oder nicht. So verstanden bezeichnet der Ausdruck „Determinismus“ eine Eigenschaft unserer Welt. Es kann aber, insbesondere im Kontext dieser Arbeit, auch sinnvoll sein, den Ausdruck in der Weise zu aufzufassen, dass er keine Eigenschaft der Welt, sondern eine Eigenschaft wissenschaftlicher (bzw. physikalischer) Theorien bezeichnet. Welche Beziehungen es zwischen diesen beiden, unterschiedlichen Verständnisweisen gibt, wird später in dieser Arbeit noch zu thematisieren sein.

Im Mittelpunkt meiner Ausführungen wird jedoch eine Analyse des Status des Determinismus in der klassischen Physik stehen. Es wird also um die Frage gehen, ob unsere klassischen physikalischen Theorien vollständig deterministisch sind oder ob sie Raum für indeterministische Effekte lassen. Den Rahmen für diesen Kern der Untersuchung bilden einige wissenschaftstheoretische Überlegungen, welche die philosophische Relevanz der Thematik erweisen sollen.

¹ Eine genauere Klärung des Begriffs erfolgt in Kapitel 3 dieser Arbeit.

Im Einzelnen werde ich in der Auseinandersetzung mit dem Thema folgendermaßen vorgehen:

Im ersten Teil der Arbeit (Kapitel zwei) möchte ich zunächst einmal begründen, warum die Frage nach dem Determinismus in der Physik für die Philosophie und die Wissenschaftstheorie eine interessante und wichtige Frage ist.

Erst danach, im dritten Kapitel, werde ich versuchen, den Ausdruck „Determinismus“ genauer zu bestimmen. Dabei werde ich verschiedene Versuche, Determinismus zu definieren, diskutieren. Insbesondere werde ich in diesem Zusammenhang auf Definitionsvorschläge von John Earman und Jeremy Butterfield eingehen.

Kapitel vier ist, genau wie das vorherige, ein zentrales Kapitel für diese Arbeit. Es setzt sich mit dem Status des Determinismus in der klassischen Mechanik auseinander. Eine bedeutsame Stellung in diesem Kapitel nimmt dabei das sog. Space-Invaders-Argument ein. Dieses Argument ist für die gesamte philosophische Debatte über die Thematik von großer Bedeutung und wird deshalb ausführlich diskutiert.

In den beiden folgenden Kapiteln werde ich die Thermodynamik (Kapitel fünf) und die Elektrodynamik (Kapitel sechs) näher beleuchten.

Danach erfolgt ein kurzes Resümee des bisher Erreichten, da man bis zu diesem Punkt schon einen guten Überblick über die zentralen Argumente in der Debatte um den Determinismus in der klassischen Physik erhalten hat. Insbesondere wird hier der Zusammenhang der drei vorhergehenden Kapitel verdeutlicht.

Kapitel acht handelt dann vom Verhältnis von Nichtlinearer Physik und Determinismus.

Im neunten Kapitel werde ich einen kurzen Blick über den engeren Rahmen dieser Arbeit hinaus werfen und in einem kleinen Exkurs auf die Relativitätstheorie und die Quantenphysik eingehen.

In Kapitel zehn geht es dann um den Determinismus als potentielle Eigenschaft unserer Welt. Dabei wird die Frage im Mittelpunkt stehen, wie unsere bisherigen Erkenntnisse über den Status des Determinismus in bestimmten physikalischen Theorien mit dem Status des Determinismus in der Welt zusammenhängen.

Schließlich wird im elften Kapitel die Rolle des Determinismus als Theorietugend besprochen. Hierbei sollen dann auch bisherige Erkenntnisse der Arbeit rekapituliert und Ergebnisse aus unterschiedlichen Kapiteln miteinander verknüpft werden. Im Anschluss folgen noch einige kurze Schlussbemerkungen.

Nach diesem Aus- und Überblick über mein weiteres Vorgehen, wenden wir uns nun der eigentlichen Thematik zu. Im folgenden Kapitel soll, wie bereits erwähnt wurde, die wissenschaftstheoretische Relevanz des Themas verdeutlicht werden. Für die dortigen Überlegungen reicht ein grobes Vorverständnis von Determinismus aus, welches das beinhaltet, was auf S. 3 bereits erwähnt wurde. Mit einem solchen, vielleicht etwas vagen, Vorverständnis lassen sich die nachfolgenden Überlegungen, wie ich denke, hinreichend gut nachvollziehen.

2. Wissenschaft - ein erfolgreiches Projekt

„Die meisten von uns hatten genügend Vertrauen in die Vorhersage einer in Kürze bevorstehenden Wiederkehr des Kometen Halley, dass sie schon weit im Voraus Wochenenddomizile auf dem Land, entfernt von den Lichtern der Städte buchten, um ihn beobachten zu können. Es stellte sich heraus, dass unser Vertrauen gerechtfertigt war. Die Wissenschaft hat genug Vertrauen in die Zuverlässigkeit ihrer Theorien, dass sie bemannte Raumfahrzeuge ins All schickt. Lläuft in einem von ihnen etwas schief, sind wir beeindruckt, aber vermutlich nicht überrascht, wenn Wissenschaftler unterstützt von Computern, sehr schnell in der Lage sind, zu berechnen, wie der verbleibende Treibstoff genutzt werden kann, eine Rakete genau in dem Moment zu zünden, der geeignet ist, sie in eine Umlaufbahn zu katapultieren, die sie zur Erde zurückbringt.“²

So beginnt das zwölfte Kapitel von Alan F. Chalmers Einführung in die Wissenschaftstheorie mit dem Titel *Wege der Wissenschaft*. Dieses Zitat führt uns vor Augen, wie tief unser Vertrauen in die Wissenschaft bzw. die Wissenschaften ist. Wir vertrauen Erkenntnissen, die mittels der Wissenschaft gewonnen wurden, weil wir Wissenschaft für eine erfolgreiche Unternehmung bzw. ein erfolgreiches Projekt des Menschen halten.³

Doch worin genau besteht eigentlich dieser Erfolg der Wissenschaft? Auf diese Frage sind mehrere Antworten möglich, denn Erfolg ist immer nur relativ zu einem Ziel bestimmbar. Fragt man sich also, warum die Wissenschaft erfolgreich ist, so fragt man immer auch nach dem Ziel von Wissenschaft. Doch was könnte das Ziel der Wissenschaft⁴ sein? Im obigen Zitat findet man bereits eine mögliche Antwort: Man könnte behaupten, das Ziel der Wissenschaft sei es, erstens, Phänomene erfolgreich vorherzusagen (Wiederkehr des Halleyschen Kometen) und, zweitens, uns in die Lage zu versetzen bestimmte Phänomene oder Prozesse gezielt steuern und kontrollieren zu können (Kurskorrektur einer Rakete). Wenn sich das Ziel von Wissenschaft in diesen beiden Funktionen erschöpfen würde, wäre dies ein rein instrumentelles Verständnis von Wissenschaft. Es gibt aber gute Gründe dafür, mit dieser Antwort nicht zufrieden zu sein bzw. nicht völlig zufrieden zu sein. Ein Wissenschaftlicher Realist⁵ z.B.

² Chalmers, A. F. (2001): *Wege der Wissenschaft: Einführung in die Wissenschaftstheorie*, Hrsg. von Niels Bergemann; Christine Altstötter-Gleich, 5., völlig überarbeitete und erweiterte Auflage, Berlin/Heidelberg/New York: Springer, S. 141.

³ Dies ist zumindest meine Ausgangsthese, welche ich hier nicht weiter begründen werde. Das heißt aber nicht, dass man diese These nicht auch kritisieren könnte.

⁴ Die folgenden Überlegungen beziehen sich primär auf die Naturwissenschaften.

⁵ Einen guten Überblick über die philosophische Position des Wissenschaftlichen Realismus liefert: Boyd, R. (1996): „Realism, Approximate Truth, and Philosophical Method“. In: Papineau, D. (Hrsg.): *The Philosophy of Science*, Oxford, New York: Oxford University Press, S. 215-255.

würde eher behaupten wollen, dass es in der Wissenschaft zwar *auch* um Vorhersage und Kontrolle geht, aber das Ziel der Wissenschaft ein anderes sei. Bas van Fraassen beschreibt in *The Scientific Image* das Ziel der Wissenschaft gemäß des Wissenschaftlichen Realismus mit den folgenden Worten:

„Science aims to give us, in its theories, a literally true story of what the world is like; and acceptance of a theory involves the belief that it is true.“⁶

Ein Realist würde also sagen, dass unsere wissenschaftlichen Theorien erfolgreich seien, wenn sie uns etwas darüber erzählten, wie die Welt „wirklich“ ist.⁷ Die näherungsweise Wahrheit⁸ unserer Theorien liefert für Realisten sogar gerade die Erklärung dafür, dass unsere wissenschaftlichen Theorien zuverlässige Vorhersagen ermöglichen und die erfolgreiche Kontrolle von Phänomenen erlauben.

Van Fraassen selbst wiederum ist die realistische Position mit einem zu großen epistemischen Risiko behaftet. Deshalb tritt er für eine Position ein, die er als „Konstruktiven Empirismus“ bezeichnet. Das Ziel der Wissenschaft gemäß dieser Position charakterisiert van Fraassen folgendermaßen:

„Science aims to give us theories which are empirically adequate; and acceptance of a theory involves as belief only that it is empirically adequate.“⁹

Natürlich ist an dieser Stelle zu klären, was „empirically adequate“ heißen soll. Van Fraassen schreibt dazu:

„For now, I shall leave that with the preliminary explication that a theory is empirically adequate exactly if what it says about the observable things and events in this world, is true - exactly if it ‘saves the phenomena’.“¹⁰

Man sieht, dass „empirische Adäquatheit“ im Bereich des Beobachtbaren mit Wahrheit zusammenfällt. Geht es hingegen um unbeobachtbare Entitäten, wie

⁶ van Fraassen, B. (1980): *The Scientific Image*, Oxford/New York: Oxford University Press, S. 8.

⁷ Allerdings kann man darüber streiten, ob van Fraassen, der ja bekanntlich gerade kein wissenschaftlicher Realist ist, an dieser Stelle eine adäquate Charakterisierung des Wissenschaftlichen Realismus abgibt. Ich denke aber, ähnlich wie van Fraassen selbst, dass er hier zumindest eine Minimalbedingung angibt, der sich alle Wissenschaftlichen Realisten anschließen müssen.

⁸ Zum Konzept der näherungsweise oder approximativen Wahrheit vgl. Boyd, S. 215-216 und 238-248.

⁹ van Fraassen (1980), S. 12.

¹⁰ Ebd.

z.B. Elektronen, die ja zweifellos in unseren wissenschaftlichen Theorien eine Rolle spielen, dann wird der Konstruktive Empirist zum Agnostiker. Er trifft also keine Aussage über die Wahrheit unserer Theorien im Bereich des Unbeobachtbaren und somit trifft er auch keine Aussage über die Existenz unbeobachtbarer Entitäten, wie z.B. Elektronen.

2.1 Kriterien für erfolgreiche wissenschaftliche Theorien

Ich habe bisher das Wissenschaftsverständnis dreier wissenschaftstheoretischer Standpunkte kurz skizziert; eine instrumentalistische Auffassung, eine realistische Auffassung und die Position des konstruktiven Empirismus.¹¹ Alle drei Positionen bestimmen das Ziel von Wissenschaft in verschiedener Weise und im Hinblick auf dieses Ziel bestimmt sich für alle diese Standpunkte der Erfolg von Wissenschaft. Einigen können sich die Vertreter der drei Auffassungen, so unterschiedlich sie auch sein mögen, aber darauf, dass Wissenschaft erfolgreich ist. Es ist darüber hinaus einsichtig, dass sich Vertreter dieser drei Positionen darauf verständigen können, dass erfolgreiche Vorhersage und Kontrolle Bedingungen dafür sind, dass man Wissenschaft als erfolgreiches Projekt bezeichnet.¹² Wissenschaftliche Theorien, die falsche Vorhersagen liefern, würde man nicht als erfolgreich bezeichnen. Vielmehr müssen die Vorhersagen hinreichend genau sein, damit man eine Theorie als erfolgreiche Theorie ansehen würde.¹³ Für den Instrumentalisten sind Vorhersage und Kontrolle die einzigen Erfolgsbedingungen, während sie für den Realisten Minimalbedingungen sind bzw. sogar so etwas wie Epiphänomene der (approximativen) Wahrheit der Theorien.

Es liegt nun nahe, zu fragen, ob es vielleicht bestimmte Kriterien gibt, die alle erfolgreichen wissenschaftlichen Theorien erfüllen müssen. Dies ist natürlich eine äußerst umfassende Frage, insbesondere, wenn man bedenkt, wie viele verschiedene Wissenschaften unser hochdifferenzierter Wissenschaftsbetrieb

¹¹ Natürlich gibt es noch andere Positionen im wissenschaftstheoretischen Diskurs. Ich wollte an dieser Stelle keine vollständige Aufzählung abliefern, sondern nur drei paradigmatische Fälle vorstellen.

¹² An dieser Stelle ist zu beachten, dass es einen Unterschied gibt, zwischen Kriterien, anhand derer man den Erfolg einer Theorie beurteilen kann, und Kriterien, die eine Theorie zu einer erfolgreichen Theorie machen.

¹³ „Falsch“ ist hier im Sinne von „nicht hinreichend gut“ zu verstehen. So ist die klassische Mechanik durchaus eine erfolgreiche Theorie, auch wenn bestimmte Vorhersagen, die aus mechanischen Betrachtungen gewonnen werden, sich im strengen Sinne als falsch erweisen und die relativistische Physik bessere Vorhersagen liefert.

hervorgebracht hat. Es scheint mir allerdings nicht sehr einleuchtend zu sein, dass für eine soziologische Theorie exakt die gleichen Kriterien gelten müssen, wie für eine biologische. Und selbst innerhalb der sog. Naturwissenschaften erscheint es, zumindest auf den ersten Blick, fragwürdig, dass z.B. biologische und physikalische Theorien die gleichen Kriterien erfüllen müssen, um erfolgreich zu sein. Dieser übergeordneten Frage, die auch die Einheit der Wissenschaft(en) bzw. Naturwissenschaft(en) betrifft, werde ich an dieser Stelle nicht weiter nachgehen. Vielmehr werde ich mich im Folgenden mit der eingeschränkteren Frage beschäftigen, ob es in der Physik Kriterien gibt, die erfolgreiche physikalische Theorien zu ebensolchen machen bzw. ich werde unterstellen, dass unsere physikalischen Theorien erfolgreich sind und werde der Frage nachgehen, ob es einheitliche Kriterien gibt, denen diese Theorien genügen.

2.1.1 Erklärung und Determinismus

Die Frage, ob es Kriterien gibt, die physikalische Theorien zu erfolgreichen Theorien machen, ist deshalb für mein Thema *Determinismus bei klassischen physikalischen Theorien* interessant, da es zumindest prima facie äußerst plausibel erscheint, dass physikalische Theorien deterministisch sein sollten.¹⁴ Dies könnte man zum Beispiel deshalb behaupten wollen, weil man davon überzeugt ist, dass in unserer Welt der Determinismus gilt. Viele Menschen sind davon überzeugt, dass die Prozesse, die in der Natur ablaufen, durch Naturgesetze bestimmt sind und dass hinreichend genaue Kenntnisse der Naturgesetze und der Anfangsbedingungen eines Systems eine Berechnung des zukünftigen Verhaltens des Systems zumindest prinzipiell erlauben.¹⁵ Deswegen, so würde man weiterargumentieren, sollten auch unsere Theorien diese Struktureigenschaft der Welt einfangen.¹⁶

¹⁴ Hier ist allerdings zu fragen, was genau „deterministisch“ heißen soll. An dieser Stelle möchte ich diese Frage jedoch erst einmal zurückstellen. Im weiteren Verlauf wird aber auf diese Frage zurückzukommen sein.

¹⁵ Manchmal wird nun behauptet, dass dieser Determinismus universell sei. Dem entgegen steht die Auffassung, dass es Ausnahmen gebe, für die diese Form des Determinismus nicht gelte, z.B. menschliche Wesen, die über einen freien Willen verfügten. Aber die Debatte um den freien Willen ist hier nicht das Thema, wenngleich die Fragen, mit denen sich diese Arbeit beschäftigt, auch für die Problematik des freien Willens relevant sein könnten.

¹⁶ Man unterstellt dabei zweierlei: Erstens, dass der Determinismus gilt und zweitens, dass unsere Theorien korrekte Weltbeschreibungen sein sollen.

Doch auch wenn man diese Überzeugung, die ja nicht ohne weiteres einsichtig ist, nicht teilt, kann man sich deutlich machen, dass „Deterministisch-sein“ eine wichtige Eigenschaft physikalischer Theorien ist.

Dies kann man sich an folgendem Beispiel veranschaulichen: Eine der Leistungen, für die wir wissenschaftliche Theorien schätzen, ist, dass sie uns Erklärungen liefern.¹⁷ Erklärungskraft ist eine Theorietugend, insofern dass eine Theorie, die mehr oder besser erklärt als eine andere, dieser anderen Theorie vorzuziehen ist. (Vorausgesetzt, dass die Theorien in jedweder sonstigen Hinsicht das Gleiche leisten.)

Im Rahmen der Atomphysik ist man in der Lage Zerfallswahrscheinlichkeiten für den radioaktiven Zerfall bestimmter Stoffe anzugeben. Man kann Aussagen wie: „Mit der Wahrscheinlichkeit x wird dieses Uranatom in den nächsten 60 Sekunden zerfallen“ treffen. Man kann aber nichts darüber aussagen, zu welchem Zeitpunkt genau ein bestimmtes Atom zerfallen wird. Das hat zur Folge, dass eine Warum-Frage von der Form: „Warum ist dieses Atom genau zum Zeitpunkt y (und nicht zum Zeitpunkt z) zerfallen?“ ist im Rahmen der aktuellen Theorien nicht beantwortbar ist. Nun stellt sich die Frage, woran das liegt. Auf diese Frage, gibt es zwei mögliche Antworten:

- a) Die Frage ist prinzipiell beantwortbar. Ein zugrunde liegender deterministischer Prozess, den wir nur nicht kennen, bestimmt, wann das Atom zerfällt.
- b) Die Frage ist prinzipiell unbeantwortbar. Der genaue Zerfallszeitpunkt wird durch einen indeterministischen Prozess bestimmt.

Nimmt man an, Antwort b) wäre wahr, dann wäre unsere Warum-Frage prinzipiell unbeantwortbar. Oder mit anderen Worten: Es gibt keine Erklärung dafür, warum das Atom genau zum Zeitpunkt y und nicht zum Zeitpunkt z zerfallen ist. Indeterministische Theorien enthalten also unvermeidliche Erklärungslücken. Wenn a) wahr wäre, gibt es keine solche *prinzipielle* Erklärungslücke.

Wenn Erklärungskraft aber eine wichtige Theorietugend ist, so ist klar, dass deterministische Theorien indeterministischen vorzuziehen sind (vorausgesetzt alle anderen Leistungen der Theorie unterscheiden sich nicht).

¹⁷ Erklärungen sind für mich an dieser Stelle erst einmal ganz allgemein Antworten auf Warum-Fragen. (Vgl. hierzu auch: van Fraassen (1980), S. 126.)

2.1.2 Ein Theorienideal der Physik?

Die vorhergehende Überlegung sollte plausibel machen, warum es gut wäre, wenn unsere physikalischen Theorien deterministisch wären. Der Ausgangspunkt unserer Überlegungen war dabei die Frage, ob es Kriterien gibt, die alle physikalischen Theorien erfüllen müssen, um erfolgreich zu sein. Auf den ersten Blick scheint es so, als könnten deterministische Theorien bestimmte Dinge leisten, die nicht-deterministische Theorien nicht leisten können.

Man könnte weiterhin auf die Idee kommen, dass es ein Theorienideal in der Physik gibt, also eine Art Kriterienkatalog, den physikalische Theorien idealerweise erfüllen, und dass es sich beim Determinismus um eines der Kriterien dieses Kataloges handelt.

Mathias Frisch hielt im Sommer 2005 einen Vortrag in Münster. In diesem Vortrag argumentierte er dafür, dass es zumindest für die klassische Physik ein solches Theorienideal gebe. Leider gibt es von Frisch keine Veröffentlichungen, in denen er diesen Punkt genauer ausführt.¹⁸

Ich werde aber dennoch die vier Punkte darstellen, die er in seinem Vortrag als methodologische Paradigmen klassischer physikalischer Theorien vorstellte. Diese vier Punkte sind:

- a) Lokalität
- b) Laplace-Determinismus
- c) Newtonsche Gesetze
- d) Konsistenz

Ich werde diese vier Punkte kurz vorstellen und außerdem durch einen fünften ergänzen.

2.1.2.1 Lokalität

Die Grundidee der Lokaliätsannahme bringt Albert Einstein in einer berühmten Textpassage zum Ausdruck:

„[D]ie Begriffe der Physik beziehen sich auf die reale Aussenwelt, d.h. es sind Ideen von Dingen gesetzt, die eine von den wahrnehmenden Subjekten unabhängige „reale Existenz“ beanspruchen (Körper, Felder, etc.), welche Ideen andererseits zu Sinnesindrücken in möglichst sichere Beziehung gebracht sind. Charakteristisch für diese physikalischen Dinge ist ferner, dass sie in ein raum-zeitliches Kontinuum eingeordnet gedacht sind. Wesentlich für diese Einordnung der in der Physik eingeführten Dinge

¹⁸ Deshalb bitte ich zu entschuldigen, dass ich an dieser Stelle nicht mit genauen Textbelegen etc. dienen kann.

erscheint ferner, dass zu einer bestimmten Zeit diese Dinge voneinander unabhängige Existenz beanspruchen, soweit die Dinge „in verschiedenen Teilen des Raumes liegen“. Ohne die Annahme solcher Unabhängigkeit der Existenz (des „So-Seins“) der räumlich distanten Dinge voneinander, die zunächst dem Alltags-Denken entstammt, wäre physikalisches Denken in dem uns geläufigen Sinne nicht möglich. Man sieht ohne solche saubere Sonderung auch nicht, wie physikalische Gesetze formuliert und geprüft werden könnten. Die Feldtheorie hat dieses Prinzip zum Extrem durchgeführt, indem sie die ihr zugrunde gelegten voneinander unabhängig existierenden elementaren Dinge sowie die für sie postulierten Elementargesetze in den unendlichen Raum-Elementen (vierdimensional) lokalisiert.

Für die relative Unabhängigkeit räumlich distanter Dinge (A und B) ist die Idee charakteristisch: äussere Beeinflussung von A hat keinen *unmittelbaren* Einfluss auf B; dies ist als „Prinzip der Nahewirkung“ bekannt, das nur in der Feld-Theorie konsequent angewendet ist. Völlige Aufhebung dieses Grundsatzes würde die Idee von der Existenz (quasi-)abgeschlossener Systeme in dem uns geläufigen Sinne unmöglich machen.“¹⁹

Das, was Einstein hier beschreibt, ist für ihn eine fundamentale Voraussetzung der Physik, sozusagen eine Bedingung der Möglichkeit von Naturwissenschaft. Man kann also davon ausgehen, dass die Lokalisationsannahme für Einstein Teil eines potentiellen Theorienideals wäre. Wenn man sich die Textstelle ansieht, so erkennt man, dass zwei Aspekte des Lokalisationsprinzips auszumachen sind:

Den ersten Aspekt kann man als Separabilitätsprinzip bezeichnen. Es besagt, dass Dinge, die „*in verschieden Teilen des Raumes liegen*“²⁰ unabhängig voneinander existieren. Sie sind distinkte Dinge, die man als unterschiedliche physikalische Objekte behandeln kann.

Den zweiten Aspekt des Lokalisationsprinzips bezeichnet Einstein als das „*Prinzip der Nahewirkung*“²¹. Es besagt, dass eine äußere Einwirkung auf A keinen unmittelbaren Einfluss auf B haben kann, sofern A und B räumlich voneinander unterschieden sind. Das Prinzip der Nahewirkung hat wiederum zwei Aspekte. Zum einen besagt es, dass es keine unendlich schnellen Signale geben kann. Die äußere Beeinflussung von A kann nicht instantan eine Veränderung an B bewirken, da die Information, dass A verändert wurde nur mit einer endlichen Geschwindigkeit zu B übertragen werden kann.

Zum anderen besagt das Prinzip der Nahewirkung auch, dass kein Einfluss über räumliche Lücken hinweg möglich ist. A kann B nur beeinflussen, wenn

¹⁹ Einstein, A. (1948): „Quanten-Mechanik und Wirklichkeit“. In: *Dialectica* 2, Paris: Presses Universitaires de France, S. 321f, Hervorhebung im Original.

²⁰ Ebd.

²¹ Ebd.

dazwischen ein räumliches Kontinuum ohne Lücken liegt. In diesem Sinne jedenfalls versteht Richard Healey die oben zitierte Passage.²²

2.1.2.2 Laplace-Determinismus

Da Determinismus das zentrale Thema dieser Arbeit ist, werde ich mich an dieser Stelle nicht umfassend äußern, sondern verweise nur auf die späteren Ausführungen. Hier sei nur gesagt, dass auch Determinismus gewöhnlich als einer der Eckpfeiler klassischer physikalischer Theorien angesehen wird. Im Verlauf der Arbeit wird geprüft werden, wie tragfähig dieser Standpunkt tatsächlich ist. Außerdem wird auch verdeutlicht werden, warum Frisch in seinem Vortrag vom „Laplace-Determinismus“ und nicht nur vom „Determinismus“ sprach.

2.1.2.3 Newtonsche Gesetze

Des Weiteren erscheint es plausibel, dass klassische Theorien die Newtonschen Axiome anerkennen. Insbesondere geht es hier um das erste und das zweite Axiom.

Das erste Axiom ist der sog. Trägheitssatz. Er besagt, dass Massen, auf die keine äußere Kraft einwirkt, nicht beschleunigt werden, also ihren Bewegungszustand beibehalten.

Das zweite Newtonsche Axiom lautet: $F = m \cdot a$.

Hierbei steht das F für eine Kraft, m für die Masse und a für die Beschleunigung.

Es ist kein physikalisches Gesetz im eigentlichen Sinne, sondern eher eine Art Schema. Das Schema muss mit einer spezifischen Kraftfunktion „gefüllt“ werden. Damit lassen sich dann Bewegungsgleichungen für physikalische Teilchen generieren.

2.1.2.4 Konsistenz

Nicht zuletzt erwartet man von physikalischen Theorien, dass sie konsistent sind. Das erfordert beispielsweise, dass die Gleichungen, die zu einer bestimmten physikalischen Theorie gehören, keine widersprüchlichen Aussagen über

²² Vgl. Healey, R. (1994): „Nonseparable Process and Causal Explanation“. In: *Studies in the History and Philosophy of Modern Science* 25, S.337-374.

den gleichen Gegenstandsbereich machen. So wäre eine mechanische Theorie, die die beiden Gleichungen $F = m \cdot a$ und $F = m^2 \cdot a$ enthält, inkonsistent.²³

Frisch nennt diese vier Aspekte (Lokalität, Laplace-Determinismus, Newtonsche Gesetze und Konsistenz) als die Eckpfeiler des klassischen Theorienideals. Ich werde an dieser Stelle zunächst nicht weiter untersuchen können, ob die Idee eines physikalischen Theorienideals und auch die hier betrachtete spezifische Ausführung dessen wirklich haltbar sind.²⁴ Ich unterstelle jedoch, dass es prima facie einsichtig ist, anzunehmen, dass es sich bei den vier Punkten um Kriterien handelt, die (klassische) physikalische Theorien erfüllen sollten. In seinen Arbeiten untersucht Frisch insbesondere den letzten Punkt, Konsistenz.²⁵ Er zeigt dabei auf, dass es in der Elektrodynamik Inkonsistenzen gibt. Ich werde mich im Verlauf dieser Arbeit mit dem Status des Determinismus beschäftigen. Eventuell wird man am Ende sehen können, inwiefern meine Ergebnisse mit denen Frischs konform gehen.

Bevor ich jedoch mit der Auseinandersetzung mit dem Determinismus beginne, möchte ich Frischs vier Kriterien noch um ein weiteres ergänzen, welches ich für wichtig halte und das im Verlauf dieser Arbeit auch noch eine Rolle spielen wird.

2.1.2.5 Paradigma des einfachen Systems

In der Physik ist man auf Idealisierungen angewiesen. Die Idealisierung in der Physik hat zwei Dimensionen. Günter Küppers beschreibt diese beiden Dimensionen folgendermaßen:

„(1) Um einen Teil der Welt zum Objekt wissenschaftlicher Untersuchungen machen zu können, muß von konkreten Sachverhalten abstrahiert werden, d.h. es müssen Begriffe gefunden werden, die eine begriffliche Einheit über die Vielheit phänomenologischer Erscheinungen herstellen. [...] In der kinetischen Gastheorie z.B. werden die Moleküle der Luft als elastische Kugeln modelliert. Diese Form der Idealisierung ersetzt konkrete Objekte und Phänomene in der Natur durch abstrakte Modelle, die dann zum Untersuchungsobjekt der Wissenschaft werden.

(2) Die zweite Dimension der Idealisierung läuft entlang der Unterscheidung spezifisch/allgemein. Sie drückt sich aus in der Suche nach allgemeinen Gesetzmäßigkeiten

²³ Jedenfalls wäre dies der Fall, sofern es keine weiteren Spezifizierungen gibt, die klarmachen, dass die erste und die zweite Gleichung nicht auf die gleichen Gegenstände in ein und demselben Moment anzuwenden sind.

²⁴ Erst in Kapitel 11 werde ich auf diesen Punkt zurückkommen.

²⁵ Vgl. Frisch, M. (2005): *Inconsistency, Asymmetry and Non-Locality: a Philosophical Investigation of Classical Electrodynamics*, Oxford/New York: Oxford University Press.

über einer Vielzahl spezifischer Effekte und ihren Erscheinungsformen. So gibt es im Phänomenbereich des Magnetismus und der Elektrizität eine Reihe spezieller Gesetze wie z.B. das Ohmsche oder das Ampèresche Gesetz, um nur zwei Beispiele zu nennen. In den Maxwell'schen Gleichungen finden diese speziellen Gesetze ihre allgemeinste Formulierung. Allgemeine Theorien erklären spezifische Phänomene als Erscheinungsform ein und derselben Ursache.“²⁶

Doch warum wird in der Physik mit Idealisierungen entlang der beiden genannten Dimensionen gearbeitet? Dies geschieht, weil das „einfache System“ ein Paradigma der klassischen Physik ist.²⁷ Aber was ist ein einfaches System? Ein System ist, so Andreas Bartels, dann einfach, wenn man es mittels weniger unabhängiger Variablen beschreiben kann²⁸ und durch die oben beschriebenen Idealisierungen wird eine solche Beschreibung erst ermöglicht.

Wegen der Unabhängigkeit der Variablen kann man die Beziehungen zwischen den einzelnen Variablen voneinander trennen und so das Gesamtsystem als Superposition der isolierten Wechselwirkungen beschreiben.²⁹ Dies gilt auch für Systeme, die zuerst durch eine große Anzahl von Variablen beschrieben werden müssen, wie z.B. Gase. Hier wird nämlich versucht, die zahlreichen (Mikro-)Variablen durch wenige Makrovariablen zu ersetzen, die über die vielen (Mikro-)Variablen mitteln.

Auch diese Idee des einfachen Systems scheint mir konstitutiv für ein klassisches Wissenschaftsverständnis im Sinne des angesprochenen Theorienideals zu sein.

Ich habe im Vorangegangenen darzustellen versucht, dass es gute Gründe gibt, ein Theorienideal der (klassischen) Physik mit den folgenden fünf Punkten für plausibel zu halten:

- a) Lokalität
- b) Laplace-Determinismus
- c) Newtonsche Gesetze
- d) Konsistenz
- e) Paradigma des einfachen Systems

²⁶ Küppers, G (1996): „Chaos: Unordnung im Reich der Gesetze“; In: Küppers, G. (Hrsg.): *Chaos und Ordnung – Formen der Selbstorganisation in Natur und Gesellschaft*, Stuttgart: Reclam, S. 155f.

²⁷ Vgl. hierzu: Bartels, A. (1996): *Grundprobleme der modernen Naturphilosophie*, Paderborn: Schöningh, S. 124.

²⁸ Vgl. Bartels, S 124.

²⁹ Dieses Paradigma ist allerdings nur begrenzt tragfähig, wie man in Kapitel 8 dieser Arbeit sehen wird.

Man hat nun (zumindest als vorläufige Arbeitshypothese) dieses mögliche Theorienideal etabliert. Die Aufgabe wäre nun, zu prüfen, inwiefern man diese fünf Kriterien tatsächlich in physikalischen Theorien verwirklicht sieht und da es sich ja um ein Theorien*ideal* handeln soll, inwiefern diese fünf Kriterien evtl. als eine Art „regulative Ideen“ eine Rolle spielen. Außerdem wäre zu untersuchen, inwiefern die fünf Kriterien für das Ideal tatsächlich konstitutiv sind und ob man de facto auf alle angewiesen ist. Obwohl dies eine spannende Frage und Aufgabe wäre, kann ich jenes in dieser Arbeit nicht umfassend untersuchen. Allerdings werde ich in Kapitel 11 versuchen, die aufgeworfenen Fragen zumindest für das Kriterium des Determinismus zu diskutieren.

2.2 Zusammenfassung

Rekapitulieren wir noch einmal kurz die wesentlichen Gedanken dieses Kapitels: Es soll begründet werden, warum die Frage nach dem Status des Determinismus in unseren physikalischen Theorien eine interessante und wichtige Frage ist. Den hier dargestellten Begründungsversuch kann man folgendermaßen zusammenfassen: Unsere wissenschaftlichen Theorien sind erfolgreich. Erfolgreich sein heißt, einem bestimmten Ziel gerecht zu werden. Unterschiedliche wissenschaftstheoretische Auffassungen bestimmen das Ziel von Wissenschaft und damit das Erfolgskriterium jeweils unterschiedlich. Dennoch können sich Vertreter verschiedener Positionen darauf einigen, dass erfolgreiche Vorhersage und Kontrolle von Phänomenen zumindest Minimalbedingungen für erfolgreiche Theorien sind. Deshalb ist es eine berechtigte Frage, ob Kriterien existieren, denen Theorien genügen müssen, um diese Bedingungen erfüllen zu können. Darüber hinaus stellt sich die Frage, ob „Deterministisch-sein“ eines dieser Kriterien ist.

Aber nicht nur im Hinblick auf Vorhersage und Kontrolle, sondern auch für wissenschaftliche Erklärungen scheint der Determinismus von Bedeutung zu sein. Indeterministische Theorien weisen unvermeidliche Erklärungslücken auf, die deterministische Theorien nicht gezwungenermaßen beinhalten.

Damit ist klar, warum die Frage nach dem Status des Determinismus in den physikalischen Theorien wichtig ist. Man kann diese Problematik sogar noch in einen größeren Rahmen einbetten. Dieser größere Rahmen ist die Frage danach, ob es so etwas wie ein Theorienideal der Physik oder zumindest der klas-

sischen Physik gibt und ob der Determinismus in diesem Ideal eine tragende Rolle spielt. Durch diese Überlegung sollte insbesondere deutlich werden, wie sehr das Thema für unser gesamtes Verständnis der Physik relevant ist. Nachdem es bis hierher (hoffentlich) gelungen ist, die Wichtigkeit meiner Fragestellung aufzuzeigen, werde ich nun in das eigentliche Thema einsteigen, indem ich klären werde, was genau man unter Determinismus verstehen kann bzw. soll.

3. Was ist Determinismus?

In diesem Kapitel soll es darum gehen, genau herauszuarbeiten, was unter dem Ausdruck „Determinismus“ zu verstehen ist. Dabei werde ich die in der Debatte zentralen Definitionsversuche vorstellen und diskutieren. Insbesondere die Definitionen von John Earman und Jeremy Butterfield spielen für mich dabei eine bedeutsame Rolle. John Earmans Buch *A Primer on Determinism*³⁰ wird darüber hinaus ein wichtiger Bezugspunkt für meine gesamte Arbeit sein.

3.1 Ursache und Wirkung

Klassischerweise wurde Determinismus in Begriffen von Ursache und Wirkung gefasst. Pierre Simon Laplace schreibt:

„Wir müssen uns also den gegenwärtigen Zustand des Weltalls als die Wirkung seines früheren und als die Ursache des folgenden Zustands betrachten.“³¹

Laplace geht davon aus, dass es in der Welt kausal zugeht. Der aktuelle Zustand der Welt wurde notwendig durch eine Ursache, nämlich die zeitlich vor ihm liegenden Zustände, bestimmt und bestimmt selbst wiederum die zeitlich nach ihm liegenden Zustände. Jedes Ereignis hat eine Ursache und ist durch diese Ursache eindeutig bestimmt. Gilt dies für die gesamte Welt, so ist die gesamte Welt deterministisch.

Allerdings ist die Definition von Determinismus über die Kausalrelation problematisch. Die erste Schwierigkeit besteht darin, dass es eben nicht ohne weiteres klar ist, worin genau überhaupt die Kausalrelation besteht. Ist sie eine den Ereignissen inhärente Struktur, die auf notwendige Weise Ursachen mit Wirkungen verknüpft? Wenn es so ist, woher kommt diese Notwendigkeit dann und wie können wir von ihr wissen? Hume z.B. bezweifelt, dass man die Notwendigkeit des gemeinsamen Auftretens zweier Ereignisse rechtfertigen kann, die man klassischerweise als Ursache und Wirkung verstehen würde. Oder ist die Notwendigkeit vielleicht, wie bei Kant, eine Notwendigkeit unseres Denkens, etwas, das wir im Erkenntnisprozess den Erscheinungen auferlegen? Andere Philosophen versuchen wiederum in ihrer Analyse ohne den problemati-

³⁰ Earman, J. (1986): *A Primer on Determinism*, Dordrecht/Boston/Lancaster: D. Reidel.

³¹ Laplace, P. S. de (1932): *Philosophischer Versuch über die Wahrscheinlichkeit*, Hrsg. von Richard von Mises, Leipzig: Akademische Verlagsgesellschaft Leipzig, S. 1.

schen Notwendigkeitsbegriff auszukommen. Es gibt also in der philosophischen Debatte zahlreiche, unterschiedliche Ansätze, deren Ziel es ist den Kausalbegriff zu erhellen. So gibt es zum Beispiel regularitätstheoretische, kontrafaktische oder interventionalistische Analysen der Kausalität.³² Ich möchte hier nicht behaupten, dass keiner dieser Ansätze tragfähig ist, dennoch würde ich mich aber an dieser Stelle Earman anschließen, der schreibt:

„The most immediate objection to this approach is that it seeks to explain a vague concept – determinism – in terms of a truly obscure one – causation. If we can achieve an analysis of determinism without explicit appeal to the notion of cause and effect, then that analysis is to be preferred to the one in question.“³³

Zwar bin ich nicht sicher, ob Kausation³⁴ wirklich so ein obskures Konzept ist, aber dennoch finde ich es überzeugend, so vorzugehen, dass man erst einmal versucht ohne ein evtl. problematisches Konzept auszukommen³⁵, insbesondere wenn man bedenkt, dass in der Physik auch nicht explizit auf die Kausalrelation Bezug genommen wird. Man kann sicherlich Zusammenhänge, die mittels der Physik beschrieben werden, in kausaler Weise interpretieren, aber das ist nichts der Physik Immanentes. John Norton vertritt einen interessanten, von Russell inspirierten, Standpunkt zum Status der Kausalität in unseren physikalischen Theorien. Er bezeichnet die Kausation als „*folk science*“³⁶. Ursachen und Wirkungen spielten zwar eine Rolle in und für die Wissenschaften, aber eben keine fundamentale. Norton meint, man müsse die Rede von Ursache und Wirkung in der folgenden Weise verstehen:

„I have argued that we can have causes in the world of science in the same way as we retain the caloric. There is no caloric in the world; heat is not a material substance. However, in many circumstances heat behaves just as if it were a material fluid, and it can be useful to think of heat this way. It is the same with cause and effect. At a fun-

³² Einen guten Überblick über die verschiedenen Ansätze zu einer Philosophie der Kausalität liefern die folgenden Artikel:

Cartwright, N. (1998): „Causation“. In: Craig, E. (Hrsg.): *Routledge Encyclopedia of Philosophy*, Band 2, London, New York: Routledge, S. 244-251;

Field, H. (2003): „Causation in a Physical World“. In: Loux, M.J., Zimmermann, D. W. (Hrsg): *The Oxford Handbook of Metaphysics*, Oxford, New York: Oxford University Press, S. 435-487.

³³ Earman, S. 5.

³⁴ Earman differenziert zwischen Kausation und Kausalität. Kausation bezieht sich tatsächlich auf die Ursache-Wirkungs-Relation, während sich Kausalität, für Earman, auf das Determinismuskonzept bezieht. (Vgl. Earman, S. 5f.)

³⁵ Sollte dies scheitern oder sich als völlig unfruchtbar erweisen, könnte man immer noch überlegen, ob man eine neue Analyse mit der Kausalrelation als Ausgangspunkt versucht.

³⁶ Norton, J. (2003): „Causation as Folk Science“. In: *Philosophers' Imprint* Vol.3, No.4, <http://www.philosophersimprint.org/003004/>, Stand 22.02.2006.

damental level there are no causes and effects in science and no overarching principle of causality. However, in appropriately restricted domains our science tells us that the world behaves as if it conformed to some sort of folk theory of causation [...].”³⁷

Norton versucht zu zeigen, welchen Wert die kausale Redeweise für die Wissenschaft haben kann. Dabei bestimmt er die Rolle der Kausalrelation als nicht fundamental. Sie hat aber ihre pragmatische Berechtigung. Es ist manchmal sinnvoll, so über Wärme zu sprechen, als wäre sie eine materielle Substanz, weil sich die Welt schlichtweg in manchen Fällen so verhält, als wäre es so. Diese Redeweise ist aber bloß pragmatisch bedingt und wird spätestens dann inadäquat, wenn man auf eine fundamentale Ebene vorstößt, auf der man versucht etwas über grundlegende Struktur unserer Welt auszusagen. Genauso verhält es sich, Nortons Meinung nach, mit der Kausalrelation. Wenn die Kausalrelation in ebendieser Weise nicht fundamental ist, dann ist sie auch nicht der geeignete Ausgangspunkt für eine Analyse des Determinismus.

3.2 Vorhersagbarkeit

Die oben (S. 18) zitierte Textstelle von Laplace geht mit den folgenden Worten weiter:

„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 die 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. Der menschliche Geist bietet in der Vollendung, die er der Astronomie zu geben verstand, ein schwaches Abbild dieser Intelligenz dar. Seine Entdeckungen auf dem Gebiete der Mechanik und Geometrie, verbunden mit der Entdeckung der allgemeinen Gravitation haben ihn in Stand gesetzt, in demselben analytischen Ausdruck die vergangenen und zukünftigen Zustände des Weltsystems zu umfassen.“³⁸

Laplace bringt also jetzt die Idee der Vorhersagbarkeit ins Spiel, um zu erklären, was Determinismus ist. Die „Intelligenz“, von der Laplace spricht, wird häufig auch als „Laplacescher Dämon“ bezeichnet. Für diesen Dämon läge bei exakter Kenntnis der Naturgesetze und des exakten Zustands der Welt zu einem gegebenen Zeitpunkt die gesamte Zukunft (und Vergangenheit) offen. Interessant ist darüber hinaus, dass Laplace sich den menschlichen Geist als nur asymptotisch verschieden von dieser Intelligenz vorstellt.

³⁷ Ebd., S. 21.

³⁸ Laplace, S. 1f.

Allerdings muss man an dieser Stelle kritisch fragen, mit welchen Fähigkeiten genau der Laplacesche Dämon ausgestattet sein soll. Später in dieser Arbeit (in Kapitel 8) wird man sehen, dass es physikalische Systeme gibt, sog. chaotische Systeme, deren Verhalten man prinzipiell nicht vorhersagen kann, solange der Vorhersager nicht gottähnliche Fähigkeiten besitzt. Dennoch gibt es gute Gründe dafür, diese chaotischen Systeme für deterministische Systeme zu halten.

Will man indes soweit gehen und den Dämon als Kreatur mit gottähnlichen Kräften verstehen, so bekommt man ein kontraintuitives Ergebnis, denn dann könnte der Dämon die zukünftigen Ereignisse vorhersagen, egal wie sie zustande kommen. Selbst, wenn es völlig zufällig wäre, welcher Zustand des Universums auf den aktuellen Zustand folgt, spricht nichts dagegen, dass ein gottähnlicher Laplacescher Dämon diese zukünftigen Zustände vorhersagen könnte. Diese Vorhersagekompetenz würde dann aber eben gerade aus seinen speziellen Fähigkeiten und nicht aus bestimmten Eigenschaften der Welt erwachsen. Dies scheint jedoch gerade nicht das zu sein, was wir mit Determinismus meinen.

Darüber hinaus ist auch nicht ohne weiteres evident, welche Rolle der Laplacesche Dämon selbst in der Welt und vor allem in seinen eigenen Gleichungen einnehmen würde. Ist er selbst Teil der Welt oder schaut er aus einer Außenperspektive auf die Welt? Wenn er aus einer Außenperspektive auf die Welt blickte, scheint der Gedanke allerdings unplausibel, dass der menschliche Geist als sein schwaches Abbild gedacht wird. Ich denke, ein Begriff von Determinismus in diesem Sinne, wäre wenig hilfreich. Wenn der Laplacesche Dämon aber selbst als Teil der Welt gedacht würde, entstehen andere Schwierigkeiten. Zum einen könnte die schon erwähnte Existenz chaotischer Systeme ein Problem darstellen, zum anderen müsste der Laplacesche Dämon dann in seinen Berechnungen der zukünftigen Zustände der Welt auch seine eigenen Zustände berechnen. Für mich ist es aber zumindest unklar, welche Konsequenzen diese Selbstbezüglichkeit hätte.³⁹

³⁹ Im Übrigen ist dies eine interessante Parallele zur Debatte um die Willensfreiheit, die durch die Ergebnisse der sog. Neurowissenschaft wieder neu entfacht wurde. Was bedeutet es für das Erkenntnissubjekt, wenn es herausfindet (bzw. herausfinden sollte), dass es nicht frei ist und dass es vielleicht sogar prinzipiell möglich wäre, das menschliche Verhalten vorherzusagen?

Auch wenn man von diesen Schwierigkeiten absieht, gibt es noch ein weiteres Problem beim Versuch Determinismus über Vorhersagbarkeit zu definieren. Es ist nämlich so, dass man, wenn man von Determinismus redet, gerade keine epistemische Kategorie zu meinen scheint. Vielmehr interessiert man sich für die ontologische Ebene, also für die Frage ob es denn in der Welt faktisch deterministisch zugeht oder eben nicht. Vorhersagbarkeit (für uns) ist aber gerade eine epistemische Kategorie, weil es von unseren spezifischen Erkenntnisfähigkeiten abhängt, ob und wie gut wir das Verhalten eines Systems vorhersagen können. Somit scheint eine Identifizierung von Determinismus mit Vorhersagbarkeit (auch für einen Laplaceschen Dämon) nicht das zu sein, was wir eigentlich haben wollen.

Im 20. Jahrhundert versuchte auch Karl Popper Determinismus über Vorhersagbarkeit zu definieren. Für Popper ist wissenschaftlicher Determinismus

„the doctrine that the state of any closed physical system at any given future instant of time can be predicted, even from within the system, with any specified degree of precision, by deducing the prediction from theories, in conjunction with initial conditions whose required degree of precision can always be calculated (in accordance with the principle of accountability) if the prediction task is given.“⁴⁰

„Poppers Dämon“ unterscheidet sich von Laplaces Dämon dadurch, dass er die Anfangsbedingungen nicht mit unendlicher Präzision kennen muss. Popper denkt, dass eine endliche Präzision ausreicht (natürlich immer im Hinblick auf die „benötigte“ Genauigkeit). Außerdem ist Popper überzeugt, dass die Vorhersage des Verhaltens eines Systems auch von einer Position innerhalb des Systems möglich ist. (Dies war ja bei Laplace nicht ganz klar.) Poppers Dämon ist keine nicht-materielle Entität, sondern er interagiert mit dem System, dessen Verhalten er vorhersagen will, genau wie ein menschlicher Wissenschaftler.

Damit werden aber lediglich Vorhersagen mit einem endlichen Grad an Präzision ermöglicht. Mithin ist Poppers Determinismus-Begriff auch ein epistemischer und kein ontologischer.

Für „Poppers Dämon“ wird das Problem chaotischer Systeme, auf das ich später noch genauer eingehen werde, noch virulenter als für den Laplaceschen Dämon. Der Vertreter der Laplaceschen Version von Determinismus könnte sich nämlich immer auf die Position zurückziehen, dass sein Dämon eine nicht-

⁴⁰ Popper, Karl: The Open Universe, zitiert nach: Earman, S. 8.

materielle Instanz ist, die darüber hinaus Gesetze und Anfangsbedingungen mit unendlicher Genauigkeit kennt. Dies ist für den Vertreter der Popperschen Determinismusversion nicht möglich. Natürlich hätte ein dieser dann immer noch die Möglichkeit zu behaupten, dass es eben so sei, dass die chaotischen Systeme gerade nicht deterministisch seien. Dieser Punkt wird, wie schon mehrfach erwähnt, in Kapitel 8 noch einmal thematisiert werden. Jedoch möchte ich hier schon klarstellen, dass ich diese Alternative wenig attraktiv und nicht sehr plausibel finde.

3.3 Earmans Definition

3.3.1 Laplace-Determinismus

John Earman versucht sich der Thematik in seinem Buch *A Primer on Determinism* über eine Mögliche-Welten-Semantik zu nähern. Eine „Welt“ wird dabei als vierdimensionale Raumzeit-Welt verstanden. Die „tatsächliche Welt“ ist die Menge aller Ereignisse, die je geschehen sind, gerade geschehen und noch geschehen werden. Eine „mögliche Welt“ ist eine Menge möglicher Ereignisse und repräsentiert so eine mögliche alternative Geschichte der „tatsächlichen Welt“.

Ausgerüstet mit diesem Handwerkszeug gibt Earman folgende Definition von Determinismus:

„Letting \mathcal{W} stand for the collection of physically possible worlds, that is, possible worlds which satisfy the natural laws obtaining in the actual world, we can define the Laplacian variety of determinism as follows. The world $W \in \mathcal{W}$ is *Laplacian deterministic* just in the case for any $W' \in \mathcal{W}$, if W and W' agree at any time, then they agree for all times.“⁴¹

Betrachtet man Earmans Definition, so fällt zuerst auf, dass er nicht einfach nur von Determinismus spricht, sondern von Laplace-Determinismus. Was er mit Laplace Determinismus meint, erklärt Earman folgendermaßen:

„The main bite of the dynamical laws comes in restrictions on the temporal transition from one allowable state to another. Laplacian determinism is a very special and very strong form of such a restriction: for any time t_1 and t_2 and any allowed state at t_1 , there is one and only one allowed state at t_2 .“⁴²

⁴¹ Earman, S. 13, Hervorhebung im Original.

⁴² Ebd., S. 12.

Laplace-Determinismus ist sozusagen die Standardform des Determinismus. In bestimmten Fällen, z.B. wenn es um relativistische Physik geht, kann es jedoch sinnvoll sein auf Nicht-Standard-Formen des Determinismus zurückzugreifen.⁴³ In dieser Arbeit, in der es primär um klassische Physik geht, möchte ich aber die Diskussion auf das beschränken, was Earman Laplace-Determinismus nennt.

Earman differenziert in seinem Buch seine Determinismusdefinition noch etwas weiter. Allerdings scheint es mir so, als wären diese Differenzierungen nicht sonderlich ergiebig oder zumindest an dieser Stelle nicht weiter relevant. Einzig auf einen Punkt möchte ich kurz hinweisen: Für Earman ist es auch denkbar, dass eine Welt „nur“ partiell deterministisch ist, also deterministisch im Hinblick auf bestimmte Größen, während sie im Hinblick auf andere Größen indeterministisch ist. Determinismus ist also nicht zwingend eine These über die gesamte Welt. Allerdings können in einem solchen Fall gewisse Spannungen entstehen. So könnte es beispielsweise sein, dass die gesamte Welt deterministisch ist mit Ausnahme eines bestimmten Teilchens, dem „*freeon*“⁴⁴. Die Größen, die dieses Teilchen charakterisieren, wären dann nicht Laplace-deterministisch im obigen Sinne. Hier entsteht aber folgendes Problem: Entweder das Freeon wechselwirkt mit dem Rest der Welt oder nicht. Wenn das Freeon nicht mit dem Rest der Welt wechselwirkt, ist es aber auch in keiner Weise nachweisbar. Man kann schlichtweg nichts von ihm wissen, es ist ein „*unknowable ghost in the deterministic machine*“⁴⁵. Wenn das Freeon aber mit dem Rest der Welt wechselwirkt, dann ist nur schwer einsehbar, wie man noch in sinnvoller Weise davon reden soll, dass der Rest der Welt deterministisch sei, denn das nicht-deterministische Verhalten des Freeons würde dann natürlich den übrigen Lauf der Welt beeinflussen (und zwar in unterschiedlichen physikalisch möglichen Welten auf unterschiedliche Weise). Man sieht also, dass es nicht unproblematisch ist, von einer Welt zu reden, die nur teilweise deterministisch ist. Es ist zwar keine Unmöglichkeit, aber es führt zu gewissen Spannungen.

Wie wir gesehen haben, bezieht sich Earmans Definition auf „Welten“ (die tatsächliche Welt und andere mögliche Welten). Entweder eine Welt ist deter-

⁴³ Vgl. ebd., S. 17.

⁴⁴ Earman, S. 13.

⁴⁵ Ebd.

ministisch oder sie ist partiell deterministisch oder sie ist nicht deterministisch. In diesem Sinne ist Earman's Determinismusbegriff ein ontologischer. Oben hatten wir diskutiert, dass ein Problem beim Versuch, Determinismus über Vorhersagbarkeit zu definieren, darin besteht, dass Vorhersagbarkeit eine epistemische Kategorie ist. Ob die Welt deterministisch ist, sollte aber gerade nicht davon abhängen, was wir über die Welt wissen können. Insofern sieht man an dieser Stelle eine Stärke von Earman's Definition. Sie fängt genau dies ein. Sagt man, dass eine Welt Laplace-deterministisch in Earman's Sinne ist, so trifft man eine ontologische Aussage.

An dieser Stelle möchte ich eine, für den weiteren Verlauf wichtige, Unterscheidung einführen. Es soll differenziert werden zwischen einer starken und einer schwachen Lesart von Earman's Definition. Die Unterscheidung betrifft den Ausdruck „*actual world*“⁴⁶ in der Definition auf S. 23, welchen ich mit „tatsächliche Welt“ übersetzt habe. In einer starken⁴⁷, wörtlichen Lesart meint der Ausdruck „tatsächliche Welt“ unsere Welt, die Welt in der wir leben. Determinismus wäre damit ausschließlich eine potentielle Eigenschaft unserer Welt. In einer schwachen Lesart jedoch meint der Ausdruck „tatsächliche Welt“ in der Definition die Welt, die gerade zur Debatte steht, also die Welt, über die man gerade redet.⁴⁸ Mit einer solchen Welt könnte dann beispielsweise auch ein Modell einer Theorie gemeint sein.⁴⁹ Folgt man dieser schwachen Lesart kommt man zu einem Determinismusverständnis, welches nicht auf unsere Welt beschränkt ist. Letztlich gelangt man damit zu einer Determinismusdefinition, wie sie im Abschnitt 3.4 dieser Arbeit dargestellt wird.⁵⁰

Welche Lesart letztlich Earman's Auffassung angemessener ist, möchte ich hier nicht abschließend klären. Es ist für die Sachverhalte, die in dieser Arbeit verhandelt werden, letztlich nicht entscheidend. Allerdings spricht für die starke Lesart zum einen, dass sich „*actual world*“ mit „tatsächliche Welt“ oder „wirkliche Welt“ übersetzen lässt, was nahe legt, dass es sich bei der entsprechenden

⁴⁶ Earman, S. 13.

⁴⁷ Stärker ist die Lesart deswegen, weil sich der Ausdruck „Determinismus“ in dieser Lesart automatisch auf unsere Welt bezieht. In der schwachen Lesart ist dieser Bezug nicht ohne weiteres gegeben.

⁴⁸ Vgl hierzu auch: Hüttemann, Andreas (2003): „Introduction: Determinism in Physics and Biology.“ In: Hüttemann, Andreas (Hrsg.): *Determinism in Physics and Biology*, Paderborn: Mentis, S. 11.

⁴⁹ Modelle wären gemäß einer solchen Auffassung mögliche Welten.

⁵⁰ Aus diesem Grund wird diese schwache Lesart erst in Abschnitt 3.4 näher beleuchtet werden.

Welt um unsere Welt handelt. Zum anderen spricht Earman darüber hinaus von den physikalisch möglichen Welten als „*possible worlds which satisfy the natural laws obtaining in the actual world*“⁵¹. Er spricht also von Naturgesetzen (bzw. sogar von „den Naturgesetzen, die in der tatsächlichen Welt gelten“) und nicht nur allgemein von Gesetzen. Der Ausdruck „Naturgesetze“ scheint mir jedoch für die speziellen Gesetze unserer Welt reserviert zu sein. Auch Earman müsste dies so sehen, da Naturgesetze für ihn Sätze in bestimmten *wahren* deduktiven Systemen sind.⁵² Andere Gesetze, z.B. Gesetze einer Theorie, würde man nicht als Naturgesetze bezeichnen.⁵³ Außerdem scheint es so zu sein, als wäre gerade die Frage nach dem Determinismus im Sinne der starken Lesart die Frage, die uns eigentlich interessiert, denn letztlich wollen wir wissen, ob es in unserer Welt deterministisch zugeht oder nicht.

Um Missverständnisse zu vermeiden: Ich möchte Earman an dieser Stelle nicht auf diese starke Lesart festlegen. Ich möchte lediglich aufzeigen, dass diese Lesart nicht unplausibel ist.

Ich werde aus Gründen der Übersichtlichkeit folgende Terminologie einführen: Die starke Lesart der Definition auf S.23 werde ich, aus den eben genannten Gründen, als *Earmans Definition* bezeichnen. Die schwache Lesart, die mit Jeremy Butterfields Definition konform geht, welche in Abschnitt 3.4 vorgestellt wird, möchte als *Butterfields Definition* kennzeichnen. Diese Unterscheidung grenzt zwei inhaltlich verschiedene Determinismusbegriffe voneinander ab.⁵⁴

Earmans Definition muss allerdings noch weiter gefüllt werden. Schließlich ist für sie grundlegend, was man unter physikalisch möglichen Welten verstehen soll. Earman erklärt zwar, was er damit meint, nämlich (in der starken Lesart) die Welten, die den Naturgesetzen, die in der tatsächlichen Welt Geltung haben, genügen. Damit wird es aber für ihn unerlässlich, etwas dazu zu sagen, was er unter Naturgesetzen versteht. Ansonsten bliebe seine Determinismusdefinition inhaltsleer. Earman vertritt eine bestimmte Version der Regulari-

⁵¹ Ebd.

⁵² Vgl. Abschnitt 3.3.2.

⁵³ Allerdings ist es möglich, dass die Gesetze einer Theorie Naturgesetze repräsentieren, sofern sie Gesetze repräsentieren, die in der wirklichen Welt gelten. Dies ist aber keinesfalls notwendigerweise so.

⁵⁴ Noch einmal sei betont, dass ich den Autor Earman keineswegs auf die starke Lesart seiner Definition festlegen will. Die Bezeichnung *Earmans Definition* erfolgt lediglich in Ermangelung einer besseren Benennung.

tätstheorie der Naturgesetze, den sog. „MRL-Account“, auf den ich nun zu sprechen kommen werde.

3.3.2 Der MRL-Account

In diesem Abschnitt werde ich versuchen, Earmans Naturgesetzbegriff etwas genauer zu beleuchten. Dabei orientiere ich mich an der Darstellung, die Earman in *A Primer on Determinism* gibt.

John Earman ist ein empiristischer Philosoph. Dementsprechend verwundert es nicht, dass er bestimmte empiristische Bedingungen erhebt, denen eine Konzeption der Naturgesetze genügen muss. Diese Bedingungen lauten:

- „(E0) Laws are contingent, i.e., they are not true in all possible worlds. [...]
- (E1) For any W_1, W_2 , if W_1 and W_2 agree on all occurrent facts, then W_1 and W_2 agree on laws. [...]
- (E2) For any W_1, W_2 , if W_1 and W_2 agree on laws, then W_1 and W_2 agree on regularities entailed by the laws.”⁵⁵

Dies sind Bedingungen, die jedem Naturgesetz zukommen. Es gibt also erstens mögliche Welten, in denen die Naturgesetze nicht gelten bzw. in denen nicht die gleichen Naturgesetze gelten. Dies besagt Bedingung (E0). Naturgesetze sind in diesem Sinn keine absoluten Notwendigkeiten. Zweitens drückt (E1) aus, dass die Naturgesetze, wie Earman an anderer Stelle sagt, „Parasiten“ der vorkommenden Fakten sind.⁵⁶ D.h. die vorkommenden Fakten haben den ontologischen Primat und den Naturgesetzen kommt eine sekundäre Stellung zu. Schließlich sagt dann Bedingung (E2) etwas darüber aus, was es bedeutet, wenn in möglichen Welten die gleichen Naturgesetze gelten. Gelten nämlich die gleichen Naturgesetze, dann gibt es bestimmte Regularitäten und diese Regularitäten sind die gleichen in den betreffenden möglichen Welten. Die vorkommenden Fakten in den Welten müssen aber natürlich nicht die gleichen sein, sondern eben nur die Regularitäten.

Earman möchte diesen Bedingungen noch zwei weitere zur Seite stellen:

- „Two things remain uncaptured by (E0)-(E2). Neither can be stated in the form of tidy constraint, but nonetheless each is an important part of the empiricist conception of laws. The first is the intuition that appropriate qualitative and quantitative differences

⁵⁵ Earman, S. 85f.

⁵⁶ Vgl. ebd., S. 85.

in particular occurrent fact and general regularity make for differences in laws (E3). The second intuition is that there is a democracy of facts and regularities in that each has a vote in electing the laws (E4).⁵⁷

Bedingung (E3) sagt etwas darüber aus, wie es möglich sein kann, dass in unterschiedlichen Welten unterschiedliche Gesetze gelten. Dazu müssen sich die vorkommenden Fakten und Regularitäten hinreichend stark unterscheiden. (E4) schließlich drückt aus, dass sowohl die Fakten als auch die Regularitäten Einfluss darauf haben, welche Regularitäten als Naturgesetze ausgezeichnet werden.

Diese fünf Bedingungen müssen jetzt mit einem konkreteren Ansatz gefüllt werden, der uns sagt, was wir unter Naturgesetzen verstehen sollen.

Der Ansatz, den Earman dabei bevorzugt, ist der sog. MRL-Account der Naturgesetze. „MRL“ steht für Mill, Ramsey und Lewis. Ideen dieser drei Philosophen sind entscheidend für dieses Verständnis von Naturgesetzen. Earman zitiert Lewis, um die zentrale Idee des MRL-Accounts klarzumachen:

„[...] a contingent generalization is a law of nature if and only if it appears as a theorem (or axiom) in each of the true deductive systems that achieves a best combination of simplicity and strength.“⁵⁸

Aber was ist unter einem deduktiven System zu verstehen? Earman bringt wiederum ein Lewis-Zitat:

„[Deductive systems are] deductively closed, axiomatizable sets of true sentences. Of these true deductive systems, some can be axiomatized more *simply* than others. Also some of them have more *strength*, or *information content*, than others. The virtues of simplicity and strength tend to conflict ... What we value in a deductive system is properly balanced combination of simplicity and strength – as much of both as truth and our way of balancing will permit.“⁵⁹

Naturgesetze sind folglich Generalisierungen, die in jedem wahren deduktiven System vorkommen, das ein optimales Verhältnis von Einfachheit und Stärke erreicht. Dabei stehen die „Systemtugenden“ Einfachheit und Stärke im Allgemeinen in Konflikt miteinander und müssen entsprechend austariert werden. Für dieses Austarieren gelten bestimmte Regeln, z.B. dass die Wahrheit des deduktiven Systems erhalten bleiben muss. Andere Regeln werden festgelegt

⁵⁷ Ebd., S. 86.

⁵⁸ Lewis, D. (1973): *Counterfactuals*; Cambridge: Harvard University Press, S. 73; hier zitiert nach: Earman, S. 87f.

⁵⁹ Lewis, S. 73; zitiert nach Earman, S. 88, Hervorhebungen im Original.

durch die Art und Weise, wie wir bestimmte Gewichtungen vornehmen und damit beeinflussen, was als optimales Verhältnis gilt.

Natürlich ist der MRL-Account nicht der einzige Ansatz zu einer Philosophie der Naturgesetze und ebenso natürlich gibt es verschiedene Einwände gegen und Probleme mit diesem Ansatz. So liegt beispielsweise die Frage nahe, was mit „Stärke“ oder „Einfachheit“ genau gemeint sein soll. „Einfachheit“ kann ja z.B. im Sinne von „mathematisch einfach“ verstanden werden oder im Sinne von möglichst „ontologisch sparsam“ etc. Zusätzlich ist nicht klar, wie und ob überhaupt diese verschiedenen Sinne von Einfachheit konform gehen. Selbst wenn man dies überzeugend klären könnte, bliebe immer noch die Frage, wie und ob man einen Grad von Einfachheit objektiv messen kann. Der Begriff „Stärke“, der in obigem Zitat durch den Zusatz „Informationsgehalt“ erläutert wird, ist ähnlich unklar.

An dieser Stelle soll und kann keine umfassende Diskussion des MRL-Accounts geleistet werden. Dies wäre eine eigene Themenstellung für eine andere Arbeit. Vielmehr sollten hier nur die Grundzüge von Earman's Naturgesetzskonzeption dargestellt werden, damit man sich ein ungefähres Bild davon machen kann, was Earman unter Naturgesetzen versteht. Für uns ist an dieser Stelle wichtig, dass Naturgesetze für Earman Generalisierungen in bestimmten, wahren deduktiven Systemen sind, dass Naturgesetze also wahre Sätze über die Welt sind.⁶⁰

Wir haben die obigen Überlegungen angestellt, da Earman's Determinismusbegriff in entscheidender Weise davon abhängt, was man unter einem Naturgesetz versteht. Wir haben gesehen, dass Naturgesetze für Earman Generalisierungen sind, die als Sätze oder Generalisierungen in unseren, im Hinblick auf Einfachheit und Stärke, besten wahren deduktiven Systemen vorkommen. Naturgesetze sind also in bestimmter Weise wahre Generalisierungen und sagen deshalb auch etwas darüber aus, wie die Welt ist.

Bindet man dies zurück an Earman's Determinismus-Definition, so liefert dies einen weiteren Grund Earman's Definition in der starken Lesart zu verstehen. Für Earman's Ansatz Determinismus zu definieren, ist der Naturgesetzbegriff

⁶⁰ Natürlich fragt man (als Philosoph) an dieser Stelle, was denn das kleine Wörtchen „wahr“ bei Earman heißen soll. Alles deutet darauf hin, dass Wahrheit auch für ihn eine Relation ist, die zwischen Sätzen und Tatsachen in der Welt besteht, dass er also im weitesten Sinne einen korrespondenztheoretischen Wahrheitsbegriff hat.

entscheidend, da man nur über diesen Begriff verstehen kann, was eine physikalisch mögliche Welt sein soll.

An dieser Stelle möchte ich noch auf einen weiteren interessanten Punkt hinweisen, den Earman im Hinblick auf den Zusammenhang von Determinismus und dem MRL-Account macht. Earman schreibt:

„The advantage offered by deterministic generalizations here is obvious: [...] they are, in their intended applications, as strong as strong can be; for given the state of the system at any instant, they entail everything true of the system, past, present and future, and any other generalization is either incompatible or adds nothing to applied strength. This helps to explain why we feel confident that in having discovered a simple set of true deterministic relationships we have discovered laws. This is not to say that determinism is either necessary or sufficient for a good trade-off between simplicity and applied strength. [...] This helps to explain why, independently of ontological considerations, determinism has been prized as a methodological guide to scientific theorizing.”⁶¹

Deterministische Generalisierungen sind in gewisser Hinsicht natürlich so stark, wie es nur eben geht. Ausgehend von bestimmten Anfangsbedingungen sagen deterministische Generalisierungen alles über ein System aus, was es über das System zu wissen gibt. (Natürlich nur über den Bereich des Systems, über den die Generalisierung überhaupt eine Aussage macht. Ich denke, dass dies auch von Earman so gedacht ist.) Das bedeutet wiederum, dass es sehr wahrscheinlich ist, dass diese deterministischen Generalisierungen auch Gesetze sind. Wenn man es jetzt noch als eine der zentralen Aufgaben von (Natur-)Wissenschaft versteht, Naturgesetze zu suchen, dann wird klar, warum man den Determinismus für eine wichtige Eigenschaft wissenschaftlicher Theorien hält.

Dieser Gesichtspunkt Earmans ergänzt sich gut mit Kapitel 1.2.1 dieser Arbeit, in dem der Zusammenhang von Determinismus und Erklärung behandelt wurde. Dort habe ich argumentiert, dass indeterministische Theorien (oder Gesetze) immer zu bestimmten Erklärungslücken führen. Dies lässt sich an dieser Stelle sinnvoll mit Earmans Tugend der Stärke in Verbindung bringen. Theorien, die mehr erklären können, sind die stärkeren Theorien. Sofern nichts anderes (z.B. Einfachheitsüberlungen) dagegen spricht, ist eine stärkere Theorie der schwächeren vorzuziehen und darüber hinaus sagt diese stärkere Theorie, falls sie noch die anderen Kriterien (Wahrheit, optimales Verhältnis von Stärke und Einfachheit) erfüllt, etwas über die Naturgesetze aus. Innerhalb Earmans

⁶¹ Earman, S. 89.

Konzeption ist damit ein Grund dafür geliefert, warum die Frage nach dem Determinismus eine wichtige Frage der Wissenschaftstheorie ist.

Allerdings bedeutet die obige Überlegung gleichzeitig, dass Probleme des MRL-Accounts evtl. auch zu Problemen für Earman's Determinismus-Definition werden können. Man kann sich z.B. die Frage stellen, welche Konsequenzen ein Scheitern des MRL-Accounts für Earman's Determinismus-Definition hätte. Oder man könnte prüfen, ob und wie sich die Determinismusdefinition ändert, wenn man einen anderen Naturgesetzbegriff zugrunde legt. Darüber hinaus stellt sich, egal für welchen Naturgesetzbegriff, die Frage, welchen epistemischen Zugang wir zu den Naturgesetzen haben können. Wenn z.B. unsere physikalischen Theorien geschlossenen deduktiven Systemen entsprechen und die Naturgesetze bestimmte Theoreme in wahren deduktiven Systemen sind, dann muss man klären, wie entschieden werden kann, ob ein deduktives System wahr ist. Des Weiteren muss man als Vertreter des MRL-Accounts überlegen, wie man entscheiden kann, ob man es tatsächlich mit einem deduktiven System zu tun hat, das im Hinblick auf Einfachheit und Stärke optimal ist. Solche und ähnliche Frage stellen sich und müssten beantwortet werden.

3.4 Butterfields Definition

Wie wir gesehen haben, stellt Earman zwar eine Definition vor, die unsere Intuitionen bzgl. des Determinismus einzufangen scheint (insbesondere ist seine Definition eine ontologische). Gleichzeitig ist Earman's Definition in ihrer starken Lesart⁶² aber auch nicht ganz unproblematisch. Dies ist der Fall, da sie sich in dieser Lesart ausdrücklich auf unsere Welt bezieht und damit voll und ganz davon abhängt, was unter einem Naturgesetz zu verstehen ist und darüber hinaus davon, welchen (epistemischen) Zugang wir zu den Naturgesetzen haben.⁶³ Aufgrund dieser Probleme könnte es vorteilhaft sein, anstelle der starken die schwache Lesart von Earman's Definition zugrunde zu legen. Man würde dann in der Definition auf S. 23 die Menge der physikalisch möglichen Welten anders bestimmen. Es wären nicht mehr die Welten, die den Naturgesetzen genügen, die in unserer Welt gelten, sondern die Welten, die den Naturgesetzen

⁶² Vgl. Abschnitt 3.3.1.

⁶³ Worin diese Schwierigkeiten genau bestehen, werden wir im Verlauf dieser Arbeit noch intensiv diskutieren (insbesondere in den Kapiteln 4, 7 und 10).

genügen, die in der Welt gelten, über deren Deterministisch-sein man sich gerade Gedanken macht. Diese Welt kann unsere Welt sein, sie muss es aber nicht sein. Es können auch andere Welten zur Debatte stehen. Diese Welten können z.B. Modelle physikalischer Theorien sein. In diesem Fall wären die Gesetze, die in den physikalisch möglichen Welten gelten müssten, die Gesetze der entsprechenden Theorie. Liest man Earman's Definition in dieser Weise, so ist die Definition vollkommen analog zu einer weiteren Determinismusdefinition, die in der philosophischen Debatte eine zentrale Stellung einnimmt. Dieser weitere, wichtige Definitionsversuch stammt von Jeremy Butterfield und scheint auf den ersten Blick praktikabler zu sein, als der Earman's.

Butterfield schreibt:

„[...] we need to think of the theory as describing single completely isolated systems, each one alone in its universe. Let us say that a sequence of states for such a single system, that conforms to the laws of the theory, is a model of the theory. So a model contains a system of the theory's kind, undergoing a history allowed by the theory: the model is a 'toy universe' or a 'toy possible world', according to the theory. [...] We say that a theory is deterministic if and only if: any two of its models that agree at a time t on the state of their objects, also agree at all times future to t .“⁶⁴

Untersuchen wir Butterfield's Ansatz etwas genauer. In ihm werden isolierte Systeme betrachtet. Dabei entsteht natürlich sofort ein Problem: Es gibt in unserer Welt faktisch keine isolierten Systeme (höchstens vielleicht das System „Universum“). Alle Systeme interagieren mit ihrer Umgebung. Man kann zwar ein System gegen bestimmte Wechselwirkungen abschirmen, aber z.B. gegen die Gravitationswechselwirkung ist keine Abschirmung möglich. Trotzdem ist das „vollständig isolierte System“ in der Physik keine ungewöhnliche Idealisierung. Vielmehr wird dort häufig so getan, als wären bestimmte Systeme von ihrer Umgebung isoliert. Das ist auch unproblematisch, so lange man sich dieser Idealisierung bewusst ist und von Fall zu Fall kritisch reflektiert, inwieweit die Idealisierung tragfähig ist.

Aus der Abfolge von Zuständen dieses isolierten Systems gewinnt Butterfield sodann den Modellbegriff. Modelle sind mögliche „Zustandsfolgen“ eines Systems, die von den Gesetzen der Theorie zugelassen sind.⁶⁵ Damit liegt es dann nahe, Determinismus in der Weise zu definieren, wie Butterfield es tut. Wenn

⁶⁴ Butterfield, J. (1998): „Determinism and Indeterminism“. In: *Routledge Encyclopedia of Philosophy*, Band 3, London/New York: Routledge, S. 37.

⁶⁵ Immer, wenn in dieser Arbeit von Modellen die Rede ist, kann der Modellbegriff in dieser Weise verstanden werden.

zwei Modelle zu einem Zeitpunkt im Zustand ihrer Objekte übereinstimmen, dann tun sie es für alle folgenden Zeitpunkte. Dies ist ein Unterschied zu Earman's Definition, denn in dieser bezieht sich die Übereinstimmung auf *alle* Zeitpunkte und nicht nur auf die zukünftigen. Earman meint allerdings, dass man seine Definition in zwei Subkonzepte aufspalten kann. Eine Welt kann „*futuristically (respectively historically) Laplacian deterministic*“⁶⁶ sein. Butterfields Definition bezieht sich nur auf das eine Subkonzept. Dies ist aber nicht weiter problematisch, da man Butterfields Definition, falls sich dies als notwendig erweisen sollte, ohne weiteres so ausbauen könnte, dass sie sich auch auf alle Zeitpunkte bezieht.

An dieser Stelle wird deutlich, warum es zunächst kein Problem für Butterfield ist, von isolierten Systemen zu sprechen. Für ihn ist Determinismus eine Eigenschaft von Theorien und keine Eigenschaft unserer Welt. Gegenstand physikalischer Erwägungen sind zumeist keine faktischen Systeme, die immer mit ihrer Umgebung wechselwirken, sondern man betrachtet (häufig) isolierte Systeme. Natürlich unterstellt man dabei, dass diese isolierten Systeme „gute Näherungen“ für die tatsächlichen Systeme darstellen.

Butterfields Definition⁶⁷ scheint somit auf Grund der Nähe zu den Theorien dichter an der physikalischen Praxis zu sein. Mit Hilfe seiner Definition erscheint es möglich, zu testen, ob physikalische Theorien deterministisch sind.

Allerdings hat diese Nähe zu den Theorien auch einen Preis. Man verliert nämlich genau das, was man bei Earman's Definition gewonnen hatte. Earman's Definition bezog sich automatisch auf unsere Welt. Dieser Bezug ist bei Butterfields Definition nicht mehr zwingend gegeben.

Man kann allerdings Überlegungen anstellen, ob sich Butterfields Definition in entsprechender Weise ausbauen lässt. Dies funktioniert aber lediglich mit mindestens einer zusätzlichen Prämisse. Diese muss etwas über das Verhältnis der physikalischen Theorien zur Welt aussagen. Ist man z.B. als Wissenschaftlicher Realist davon überzeugt, dass unsere aktuellen physikalischen Theorien zumindest näherungsweise wahr sind und sollte sich überdies herausstellen, dass unsere aktuellen physikalischen Theorien im Sinne Butterfields determi-

⁶⁶ Earman, S.13.

⁶⁷ Im Folgenden werde ich nur noch von Butterfields Definition und Earman's Definition sprechen. Wie schon mehrfach erwähnt, soll der Ausdruck „Earman's Definition“ die starke Lesart von Earman's Definition bezeichnen, während Butterfields Definition der schwachen Lesart von Earman's Definition entspricht.

nistisch sind, dann wäre man wahrscheinlich sehr sicher, dass die Welt (bzw. der Teil der Welt, der von den Theorien erfasst wird) deterministisch ist.

Wie dem auch sei, ich werde mich im Folgenden mit einigen physikalischen Theorien und dem Status des Determinismus in ebendiesen auseinandersetzen. Dabei wird man feststellen, dass sich aus diesen Überlegungen unterschiedliche Konsequenzen ergeben, je nachdem, welchen Determinismusbegriff man zugrunde legt. Es ist durchaus denkbar, dass die physikalisch möglichen Welten im Sinne der starken Lesart von Earman deterministisch sind, während es die physikalischen Theorien nicht sind oder umgekehrt. Dann müsste man über die Wahrheit des Determinismus unterschiedliche Aussagen machen, je nachdem ob man Determinismus im Sinne Earmans oder im Sinne Butterfields versteht.

Einen Punkt möchte ich noch betonen. Es scheint so zu sein, als hätte Butterfields Definition im Vergleich zu Earmans deutliche pragmatische Vorzüge, denn es erscheint so, als wäre es leichter darüber zu reden, ob Theorien deterministisch sind, als darüber, ob unsere Welt deterministisch ist. Der Grund dafür ist, dass wir zu den Gesetzen von Theorien einen besseren Zugang zu haben scheinen, als zu den Naturgesetzen unserer Welt. Dies heißt aber nicht, dass Butterfields Definition korrekt und Earmans falsch ist. Vielmehr erachte ich Earmans Definition für die interessantere und gehaltvollere. Allerdings bin ich der Meinung, dass es einfacher ist, sich mit Determinismus in dem Sinne zu beschäftigen, wie Butterfield ihn versteht. Man kann dann immer noch überlegen, ob man mittels zusätzlicher Prämissen oder Argumente zu Aussagen bezüglich des „Deterministisch-seins“ unserer Welt übergehen kann.

3.5 Zusammenfassung

In diesem Kapitel haben wir verschiedene Versuche, Determinismus zu definieren, kennen gelernt. Der erste Ansatz, mit dem wir uns auseinandergesetzt haben, war der Versuch, Determinismus über die Ursache-Wirkungs-Relation zu bestimmen. Dieser Ansatz ist allerdings mit verschiedenen Problemen belastet. Eine zentrale Schwierigkeit ist, dass er voraussetzt, dass es eine überzeugende Antwort auf die Frage gibt, was überhaupt Kausalität ist. Dass es eine solche überzeugende Antwort gibt, ist zwar nicht ausgeschlossen, aber

unklar. Darüber hinaus scheint es ohnehin so zu sein, dass die Kausalrelation keine fundamentale Rolle in unseren physikalischen Theorien spielt.

Anschließend haben wir uns mit dem Versuch beschäftigt, Determinismus über Vorhersagbarkeit zu definieren. Das zentrale Problem hierbei ist jedoch, dass Vorhersagbarkeit (für uns) eine epistemische Kategorie ist, wohingegen „deterministisch-sein“, unseren Intuitionen nach, eine ontologische Kategorie sein sollte.

Der dritte Definitionsversuch, den wir uns angesehen haben, stammt von John Earman. Er erscheint vielversprechend und stellt heute eine Standarddefinition in der philosophischen Debatte dar. Earman definiert Determinismus als eine Doktrin über physikalisch mögliche Welten. Allerdings ist für die Frage, was eine physikalisch mögliche Welt ist, zu klären, was man unter einem Naturgesetz versteht. Es wurde in diesem Zusammenhang vorgeschlagen zwischen einer starken und einer schwachen Lesart der Definition zu differenzieren. In der starken Lesart versteht man die physikalisch möglichen Welten als die Welten, in denen die gleichen Naturgesetze gelten, wie in unserer Welt. Determinismus ist damit eine potentielle Eigenschaft unserer Welt.

Folgt man jedoch der schwachen Lesart von Earmans Definition, so gelangt man zu einem Determinismusverständnis, das dem von Jeremy Butterfield entspricht. Für Butterfield ist Determinismus eine Eigenschaft von Theorien. Dieser Ansatz hat gegenüber dem Ansatz Earmans (in der starken Lesart) pragmatische Vorzüge, denn von den Gesetzen physikalischer Theorien scheinen wir eine bessere Kenntnis zu besitzen als von den Naturgesetzen unserer Welt. Allerdings hat Butterfields Definition den Nachteil, dass sie nicht mehr zwingend auf unsere Welt Bezug nimmt. In diesem Zusammenhang ist nämlich die Frage nach dem Verhältnis der wissenschaftlichen Theorien zur Welt wichtig und klärungsbedürftig.

4. Klassische Mechanik

Wie im Vorhergehenden bereits erwähnt wurde, scheint es so zu sein, als wäre die klassische Physik geradezu ein Paradebeispiel für den Determinismus. Dies ist zumindest eine intuitive Auffassung, die man von den Prozessen hat, die mittels der klassischen Physik beschrieben werden. Ein Blick in physikalische Lehrbücher und Lexika zeigt, dass nicht nur im Alltagsverständnis, sondern auch in der Physik selber ganz selbstverständlich davon ausgegangen wird, dass die klassische Physik und im Speziellen die klassische Mechanik deterministisch sind. Beispielhaft zeigen dies die folgenden Zitate aus einem Lehrbuch für Mechanik und aus einem physikalischen Lexikon:

„Die Bewegungsgleichungen der Mechanik sind deterministisch, d.h. für gegebene Anfangsbedingungen sind die Lösungen für alle Zeiten eindeutig.“⁶⁸

„Als philosophisches Prinzip hat der Determinismus seine Wurzeln in der griechischen Philosophie; für die Physik wurde er jedoch erst im 18. Jahrhundert mit dem Ausbau der Mechanik relevant, die eine deterministische Beschreibung von Bewegungsvorgängen oder allgemeiner von Zustandsänderungen liefert [...].“⁶⁹

Wenn wir zwei Modelle der klassischen Physik, d.h. Abfolgen von Zuständen in zwei isolierten Systemen⁷⁰, betrachten, dann scheint es auf den ersten Blick folgendermaßen zu sein: Wenn die Zustände aller Objekte in den jeweiligen Systemen zu einem Zeitpunkt übereinstimmen, dann stimmen die Systeme auch für alle weiteren Zeitpunkte im Hinblick überein.

Ob allerdings diese Überzeugung wirklich den Tatsachen entspricht, soll in diesem Kapitel kritisch überprüft werden. Dazu ist allerdings noch eine Vorüberlegung wichtig:

Man kann die Frage nach dem Determinismus auch in der Sprache der Mathematik als sog. Anfangswertproblem ausdrücken. Als Anfangswertproblem (manchmal auch Cauchy-Problem) bezeichnet man Problemstellungen, in denen aus vorgegebenen Anfangswerten zu einem Zeitpunkt mittels einer oder mehrerer Differentialgleichung(en) Funktionswerte für spätere Zeitpunkte er-

⁶⁸ Kuypers, F.: *Klassische Mechanik*, 7. Auflage, Weinheim: WILEY-VCH Verlag, S. 67.

⁶⁹ Greulich, W. (Hrsg.) (1999): *Lexikon der Physik*, Band 2, Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag, S. 9.

⁷⁰ So bestimmt Butterfield, was ein Modell einer physikalischen Theorie ist. Vgl. Abschnitt 3.4.

rechnet werden sollen. Man kann sagen: Ein System ist genau dann deterministisch, wenn es mittels einer (oder mehrerer) Differentialgleichung(en) beschrieben werden kann, für die das Anfangswertproblem genau eine Lösung für jeden Zeitpunkt hat.⁷¹

4.1 Newtonsche Raumzeit

Zu Beginn muss geklärt werden, wie die grundsätzliche Struktur der Raumzeit gemäß der Newtonschen Physik aussieht, denn diese Struktur bildet die Basis für alle von der klassischen Physik zugelassenen möglichen Welten. Wie sieht also die Raumzeit der Newtonschen Physik aus?⁷²

1. Die Newtonsche Raumzeit hat vier Dimensionen.
2. Innerhalb dieser vierdimensionalen Raumzeit gibt es dreidimensionale Hyperflächen, die Ebenen⁷³ absoluter Gleichzeitigkeit. Liegen zwei Ereignisse auf der gleichen Ebene, so finden sie gleichzeitig statt.
3. Diese grundsätzliche Struktur wird dann „gefüllt“ mit den Werten verschiedener physikalischer Größen. Dabei haben die Größen zu jeden Zeitpunkt einen festen Wert.
4. Weiterhin haben die dreidimensionalen Ebenen der absoluten Gleichzeitigkeit eine euklidische Struktur, d.h. die Struktur des Raumes genügt der euklidischen Geometrie.
5. Außerdem gibt es einen wohldefinierten Sinn von zeitlicher Dauer bzw. von zeitlichem Abstand für Ereignisse, die nicht gleichzeitig stattfinden (d.h. die nicht auf einer Ebene absoluter Gleichzeitigkeit liegen).
6. Es gibt einen „absoluten Raum“, der unter anderem dafür garantiert, dass sich eine bestimmte Klasse von Bezugssystemen, die Inertialsysteme, auszeichnen lässt.

Dies ist die Folie, vor der wir die nachfolgenden Betrachtungen anstellen werden. Dabei dürfte klar sein, dass diese Konzeption einer Raumzeitstruktur von modernen physikalischen Theorien in Frage gestellt bzw. sogar als falsch erwiesen wird. Aber da wir uns hier ja zuerst einmal mit Newtonscher Physik beschäftigen möchten, kümmern wir uns darum vorerst nicht.

⁷¹ Dies gilt, sofern es im Falle mehrerer Lösungen keine physikalischen Einschränkungen gibt, die alle Lösungen bis auf eine verbieten. Ein System, welches so beschreibbar wäre, wäre ebenfalls deterministisch.

⁷² Vgl. hierzu: Earman, S. 23 - 30.

⁷³ Die Ebenen im vierdimensionalen Raum sind dreidimensionale Objekte.

4.2 Gravitierende Massen

Die klassische Mechanik gilt als geradezu paradigmatisches Beispiel für den Determinismus. Der Fall, den man dabei zumeist vor Augen hat, ist die Newtonsche Himmelsmechanik. Diese wird idealisiert dargestellt durch Punktmassen, die sich gemäß des Newtonschen Gravitationsgesetzes bewegen. Es wäre nun eigentlich angebracht dieses Beispiel zu betrachten. John Earman schlägt allerdings vor, zuerst nicht das Newtonsche Gravitationsgesetz, sondern eine andere Kraftfunktion zugrunde zu legen. Ich halte das für gerechtfertigt, da sich der entscheidende Gesichtspunkt hieran in der Tat einfacher verdeutlichen lässt. Ich werde im Folgenden Earmans Darstellung kurz wiedergeben.⁷⁴

Wir betrachten N Punktmassen, alle mit einer Masse größer null. Diese Massen ziehen sich an, aber nicht gemäß des Newtonschen Gravitationsgesetzes, sondern mit einer Anziehungskraft, die proportional zum Produkt der Massen und zum Abstand der Massen ist. Damit ist man in der Lage das zweite Newtonsche Axiom mit einer bestimmten Kraftfunktion zu füllen. Man erhält als Bewegungsgleichung für das k -te Teilchen:

$$m_k \ddot{\vec{r}}_k = \sum_j C m_j m_k (\vec{r}_j - \vec{r}_k) \quad \text{mit: } j \neq k \quad [1]$$

C ist dabei eine positive Konstante, m bezeichnet die Masse und \vec{r} den zu einer bestimmten Masse gehörigen Ortsvektor. Man kann nun ein Inertialsystem finden, in dem der Schwerpunkt des Systems im Koordinatenursprung ruht. In diesem Inertialsystem kann man die entsprechenden Differentialgleichungen entkoppeln und ist dann in der Lage bei gegebenen Anfangskoordinaten und Anfangsgeschwindigkeiten der einzelnen Massen das Anfangswertproblem zu lösen. Dabei stellt sich heraus, dass das Anfangswertproblem genau eine Lösung hat, die sich auch noch in geschlossener Form angeben lässt. Earman formuliert die Bedeutung dieses Ergebnisses folgendermaßen:

“Every physically possible history of the system is thus comprehended in a single analytic formula, and the possible pasts and possible futures of the system are, in Laplace’s words, present before our eyes.”⁷⁵

⁷⁴ Vgl. zum Folgenden Earman, S. 30 -32.

⁷⁵ Ebd., S. 31.

Legt man nicht die obige Kraftfunktion, sondern das Newtonsche Gravitationsgesetz mit seiner r^{-2} -Abhängigkeit zugrunde, so stellt sich die Situation etwas komplizierter dar. Die Bewegungsgleichung lautet dann:

$$m_k \ddot{\vec{r}}_k = \sum_j \frac{G m_j m_k (\vec{r}_j - \vec{r}_k)}{(\vec{r}_j - \vec{r}_k)^3} \quad \text{mit: } j \neq k \quad [2]$$

G bezeichnet hierbei die Gravitationskonstante. Nun erhält man für das zugehörige Anfangswertproblem zwar ebenfalls genau eine Lösung, allerdings in bestimmten Fällen nur lokal in der Zeit. Dies sind Fälle mit drei oder mehr Punktmassen. Hier kann es sein, dass die Differentialgleichung nur für ein bestimmtes Zeitintervall lösbar ist. In diesen Fällen kann man deshalb die Lösung nicht als glatte (d.h. stetige und stetig differenzierbare) Funktion im Zeitintervall von $t_1 = -\infty$ bis $t_2 = \infty$ angeben, sondern die Funktion ist nur in einem Intervall mit endlichen t_1 und/oder t_2 glatt. Außerhalb dieses Intervalls gilt dann die Differentialgleichung nicht mehr zwingend. Wenn die Lösung in dieser Weise nur lokal für ein bestimmtes Zeitintervall gilt, treten Singularitäten auf (nämlich genau an den Stellen, wo die Funktion nicht glatt ist).

Man kann nun Überlegungen anstellen, wie diese Singularitäten physikalisch zustande kommen können. Da die Massen gravitieren, liegt es nahe, dass die Massen auch kollidieren können und dass diese Fälle durch Gleichung [2] einfach nicht mehr erfasst werden. Die Newtonsche Mechanik macht schlichtweg keine Aussage darüber, was im Fall der Kollision von zwei oder mehr Punktmassen geschieht.⁷⁶ Carl Hofer nennt in diesem Zusammenhang das folgende Beispiel:

„Consider three identical point-particles approaching each other at 120 degree angles and colliding simultaneously. That they bounce back along their approach trajectories is possible; but it is equally possible for them to bounce in other directions (again with 120 degree angles between their paths), so long as momentum conservation is respected.”⁷⁷

Aber dennoch könnte der Determinismus für die Newtonsche Mechanik, laut Earman, in folgender Weise aufrechterhalten werden:

⁷⁶ Vgl. Butterfield, S. 35.

⁷⁷ Hofer, C. (2003): „Causal Determinism“. In: *Stanford Encyclopedia of Philosophy*, <http://plato.stanford.edu/entries/determinism-causal/>, Stand: 05.02.2006.

„Barring collisions, Newtonian gravitational theory of point mass particles is Laplacian deterministic.

And we can make [this] sound more impressive by adding that the antecedent is almost always satisfied, for it is known that the set of initial conditions which lead in a finite time to collision is of (Lebesgue) measure zero [...].”⁷⁸

Dabei ist allerdings zu beachten, dass Maß null nicht unbedingt impliziert, dass man die entsprechenden Anfangsbedingungen ignorieren kann, da Maß null eben nicht Unmöglichkeit impliziert. Es mag z.B. Gründe dafür geben, dass genau diese Fälle die physikalisch interessantesten Fälle sind. Earman gibt folgendes Beispiel:⁷⁹ Wir betrachten den Fall zweier Punktmassen. Die Zustände, die hier zur Kollision führen können, haben Maß null, da Kollisionen nur vorkommen, wenn das Drehmoment gleich null ist. Zustände, in denen das Drehmoment gleich null ist, sind aber vom Maß null. Wenn wir uns allerdings aus bestimmten Gründen genau für Zustände dieser Art interessieren sollten, werden Kollisionen höchst wahrscheinlich. Für $N = 2$ kommt es dann sogar in jedem Fall zur Kollision.

Ein viel wichtigerer Einwand gegen den Determinismus der Mechanik scheint ohnehin zu sein, dass es möglicherweise falsch ist, dass die Newtonsche Gravitationstheorie für Punktmassen deterministisch ist, wenn wir von Kollisionen absehen. Es ist, so Earman, eine offene Frage, ob es nicht doch möglich ist, dass Nicht-Kollisions-Singularitäten existieren. Ich gehe an dieser Stelle nicht weiter auf Earmans Ausführungen zu diesem Punkt ein und verweise lediglich auf das, was Earman in seinem Buch schreibt.⁸⁰ Das Ergebnis seiner Überlegungen ist, dass es keine mathematische Notwendigkeit dafür gibt, dass alle Singularitäten auf Kollisionen zurückführbar sind. Im Folgenden werde ich ein für die Debatte zentrales Argument diskutieren, das sog. Space-Invaders-Szenario. Hier wird sich an späterer Stelle auch die Frage stellen, ob es Singularitäten geben kann, die nicht auf Kollisionen zurückführbar sind.

⁷⁸ Earman, S. 31.

⁷⁹ Vgl. ebd., S. 31f.

⁸⁰ Vgl. ebd., S. 32.

4.3 Das Space-Invaders-Argument

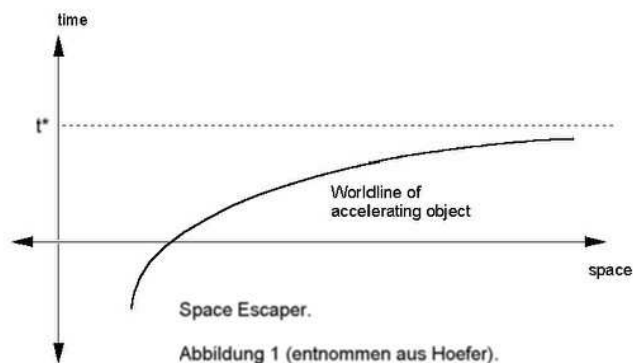
4.3.1 Space Escapers

Wie bereits gesagt, möchte ich nun auf ein zentrales Argument Earmans eingehen, das den problematischen Status des Determinismus in der klassischen Physik erweisen soll.

Wir haben schon bei der Diskussion von Butterfields Determinismusdefinition gesehen, dass es problematisch sein kann, wenn man den Determinismusbegriff auf einzelne, reale Systeme beschränkt. Es ist nämlich nicht möglich, reale Systeme gegen jeden äußeren Einfluss abzuschirmen. Dies kann weitreichende Konsequenzen haben. Deshalb ist es zuerst einmal sinnvoll, den Determinismus in „globaler Form“, entweder als These über die ganze Welt oder als These über isolierte Systeme (also Modelle einer Theorie), zu betrachten.

Aber auch, wenn man die Frage nach dem Determinismus auf diesen Bereich beschränkt, ergibt sich, laut Earman, ein unlösbares Problem, sofern man die klassische Mechanik zugrunde legt.⁸¹ Er argumentiert dabei so:

In der klassischen Mechanik gibt es keine obere Schranke für die Geschwindigkeiten von Teilchen oder Signalen. (Erst in der Relativitätstheorie gibt es eine solche obere Schranke.) Ohne diese oberen Schranke ist der folgende Fall möglich: Wir betrachten ein Teilchen, dessen Geschwindigkeit in der Weise wächst, dass sich das folgende Zeit-Raum-Diagramm ergibt:



Man sieht, dass zu einem bestimmten Zeitpunkt t^* (gestrichelte Linie) das Teilchen aus dem Universum verschwunden ist, da seine Weltlinie niemals den Zeitpunkt t^* erreicht.

⁸¹ Vgl. Earman, S. 33.

Zunächst kann man sich an dieser Stelle fragen, ob es überhaupt eine mathematische Funktion gibt, die ein derartiges Verhalten beschreibt. Sollte es eine solche Funktion nicht geben, würde daraus ein erster Einwand gegen Earman's Argument erwachsen. Allerdings ist es ganz offensichtlich, dass eine solche Funktion existiert. Beispielsweise kann man das gewünschte Verhalten mittels einer einfachen Exponentialfunktion beschreiben:

$$t(s) = -e^{-(s-s_0)} + t^* \quad [3]$$

Man sieht also, dass es eine relativ einfache Funktion gibt, die das gewünschte Verhalten zeigt. Die Umkehrfunktion von $t(s)$ lautet:

$$s(t) = -\ln(t^* - t) + s_0 \quad [4]$$

Bildet man die Ableitung von $s(t)$, so ergibt sich:

$$\dot{s}(t) = \frac{1}{t^* - t} = v(t) \quad [5]$$

Berechnet man dann die (linksseitigen) Grenzwerte $t \rightarrow t^*$ von [4] und [5], erhält man:

$$\lim_{t \rightarrow t^*} s(t) = \infty \quad [6]$$

$$\lim_{t \rightarrow t^*} \dot{s}(t) = \infty \quad [7]$$

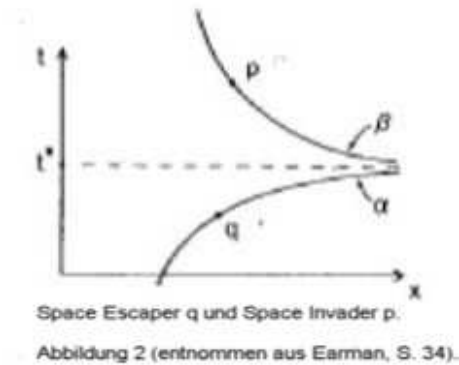
Dies ist das Ergebnis, das wir gefordert hatten, dass nämlich sowohl die Ortsfunktion als auch die Geschwindigkeitsfunktion des Teilchens über alle Grenzen anwachsen, wenn wir uns t^* nähern.

4.3.2 Space Invaders

Bis zu diesem Punkt hat die Überlegung noch nicht viel mit der Frage nach dem Determinismus zu tun. Wenn ein Teilchen aus dem Universum verschwindet, dann ist es eben weg. Vorher konnte es mit anderen Teilchen wechselwirken, jetzt nicht mehr. Da man problemlos den Zeitpunkt t^* berechnen kann, zu dem das Teilchen aus dem Universum verschwindet, weiß man auch, wie lange es zu Wechselwirkungen des Teilchens mit anderen Teilchen kommen kann.

Der springende Punkt ist nun, dass die klassische Mechanik vollkommen zeit-symmetrisch ist. Jedes Modell, das aus einem konsistenten Modell der klassischen Mechanik durch Zeitumkehr gewonnen wird, ist selbst auch ein konsi-

stentes Modell der Theorie.⁸² Also betrachten wir nun das zeitliche Spiegelbild unseres „Space Escapers“. Wir betrachten dazu die Darstellung aus Earman's Buch. Sie zeigt in einem Bild sowohl die Weltlinie des Space Escapers als auch die Weltlinie des Space Invaders:



Kurve α beschreibt die Weltlinie des Teilchens q, das aus dem Universum verschwindet („Space Escaper“). Kurve β beschreibt die Weltlinie des Teilchens p. Dieses Teilchen ist ein „Space Invader“. Es erscheint aus der räumlichen Unendlichkeit im Universum. Was bedeutet das? Es bedeutet, dass es mit der klassischen Mechanik nicht nur verträglich ist, dass ein Teilchen aus dem Universum verschwindet, sondern auch, dass plötzlich ein Teilchen im Universum auftaucht.

Vor dem Auftauchen des Teilchens deutete nichts darauf hin, dass es erscheinen würde und das ist augenscheinlich ein Problem für den Determinismus. Die Schwierigkeit ergibt sich zum einen wegen des plötzlichen Auftauchens des Teilchens selbst und zum anderen, weil das Teilchen nach seinem Auftauchen mit anderen Teilchen wechselwirkt und diese so beeinflusst. Gemäß diesem Argument wäre das Universum kein abgeschlossenes System.

Carl Hoefer macht noch die folgende Bemerkung, die dem Argument zusätzliche Schlagkraft verleiht:

„One might think that the infinity of space is to blame for this strange behaviour, but this is not obviously correct. In finite, “rolled up” or cylindrical versions of Newtonian space-time space-invader trajectories can be constructed [...]”⁸³

⁸² Vgl. Hoefer.

⁸³ Hoefer.

Doch der entscheidende Einwand gegen Earmans Argument scheint ohnehin ein anderer zu sein. Earman nimmt ihn vorweg und antwortet auch direkt darauf:

„Please do not complain that we never have observed such disturbing disappearing and appearing acts and that, by induction, it is reasonable to expect that we never will. Determinism is a doctrine not just about the actual world but about all physically possible worlds. So even if we can safely employ induction to conclude that no such particles are actual, Laplacian determinism is still threatened if such processes are physically possible.“⁸⁴

Untersuchen wir doch etwas genauer, ob Earman damit wirklich den Einwand ausräumt.

4.3.3 Was zeigt das Argument im Hinblick auf unsere Welt?

Earmans eigene Definition von Determinismus bezieht sich auf physikalisch mögliche Welten. Wir haben gesehen, dass zwei mögliche Verständnisweisen des Ausdrucks „physikalisch mögliche Welten“ in Earmans Definition gibt, je nachdem ob man eine starke oder eine schwache Lesart zugrunde legt.⁸⁵ In diesem Abschnitt wird unterstellt, dass er eine Aussage im Hinblick auf die starke Lesart seiner Definition machen will. Sein Argument funktioniert dann in folgender Weise:

P1: Determinismus ist eine Doktrin über die physikalisch möglichen Welten.

P2: Space Invaders sind physikalisch möglich, d.h. es gibt Welten, in denen die gleichen Naturgesetze wie in unserer Welt gelten und in denen Space Invaders existieren.

P3: Space Invaders verletzen den Determinismus.

C: Der Determinismus ist falsch.

Aber ist Earmans Argument vor dem Hintergrund der starken Lesart seiner eigenen Determinismusdefinition wirklich überzeugend? Um diese Frage zu beantworten, betrachten wir die drei Prämissen des Arguments noch einmal genauer. Prämisse 1 repräsentiert Earmans Determinismusdefinition und wir stellen an diesem Punkt gerade im Hinblick auf diese Definition unsere Unter-

⁸⁴ Earman, S. 35.

⁸⁵ Vgl. Abschnitt 3.3.1.

suchung an. Deshalb ist diese Prämisse in diesem Argument eine Voraussetzung und kann (an dieser Stelle) nicht bestritten werden. Prämisse 3 des Arguments ist unproblematisch. Space Invaders verletzen den Determinismus, da sich unsere Welt und eine physikalisch mögliche Welt, die bis zum Auftauchen des Space Invaders mit unserer übereinstimmte, nach dem Auftauchen unterscheiden.

Aber Prämisse 2 des Arguments besagt, dass die Space Invaders physikalisch möglich sind. Dies ist tatsächlich nicht unproblematisch, denn „physikalisch möglich“ wurde von Earman (gemäß der starken Lesart) bestimmt als „den Naturgesetzen, die in der tatsächlichen Welt gelten, genügend“. Also müssen wir fragen, ob die Welten mit Space Invaders den Naturgesetzen der tatsächlichen Welt genügen. Naturgesetze sind aber, anders als die Gesetze einer Theorie, Gesetze, die faktisch in einer Welt gelten.⁸⁶ Das bedeutet letztlich, dass wenn die Naturgesetze den Gesetzen irgendeiner physikalischen Theorie entsprechen sollen, dann wäre dies nur bei einer wahren physikalischen Theorie der Fall. Offensichtlich ist die Klassische Mechanik aber keine wahre physikalische Theorie.

Allerdings erscheint es natürlich unattraktiv, dass man letztlich nur entscheiden kann, was physikalisch möglich ist, wenn man es mit einer erwiesenermaßen wahren Theorie zu tun hat. Deshalb könnte man dafür argumentieren wollen, dass unsere aktuellen Theorien zumindest näherungsweise wahr sind und uns ihre Theorieeigenschaften auch eine gute Idee davon geben, welche Eigenschaften letztlich eine wahre Theorie haben wird. Aber auch hier wissen wir, dass die Klassische Mechanik im strengen Sinne falsch ist. Die Relativitätstheorie zeigt uns, dass es doch eine obere Schranke für Geschwindigkeiten gibt. Überdies gehört die Relativitätstheorie anerkanntermaßen zu unseren momentan besten Theorien. Auch wenn man argumentieren wollte, dass die Klassische Mechanik doch in vielen Bereichen eine hinreichend gute Näherung sei, ginge dies schief. Denn zum einen betrifft die Frage nach dem Determinismus in erster Linie unsere fundamentalen Theorien⁸⁷ und nicht Näherungen, die wir aus praktischen Gründen benutzen, und zum zweiten versagt die „Näherung

⁸⁶ Naturgesetze sind für Earman Generalisierungen, die in jedem *wahren* deduktiven System vorkommen, das ein optimales Verhältnis von Einfachheit und Stärke erreicht (vgl. Abschnitt 3.3.2).

⁸⁷ Fundamentale Theorien sind Theorien, die wir als potentielle Kandidaten für wahre Theorien betrachten, Theorien also, denen wir zutrauen, dass sie einfangen, wie die Welt „wirklich“ ist.

Klassische Mechanik“ genau in dem Bereich, der für das Beispiel entscheidend ist, nämlich für hohe Geschwindigkeiten.

Letztlich heißt das, dass Earman's Space-Invaders-Beispiel im Grunde genommen kein Problem für die starke Lesart seiner Determinismusdefinition darstellt. Das Earman-Zitat auf Seite 44 legt allerdings nahe, dass Earman glaubt, ein solches Problem aufzeigen zu können.⁸⁸ Wenn man jedoch etwas über den Determinismus in unserer Welt aussagen will, kann man nicht auf Grundlage von Theorien argumentieren, die sich als im strengen Sinne falsch erwiesen haben.

4.3.4 Was zeigt das Argument im Hinblick auf die klassische Mechanik?

Immerhin kann man an dieser Stelle aber auf die Idee kommen, dass Earman's Beispiel zumindest dazu taugt, zu zeigen, dass die physikalische Theorie „Klassische Mechanik“ nicht deterministisch ist. Damit hätte man auch etwas Wichtiges gezeigt, insbesondere wenn man Determinismus in Butterfields Sinne als Theorieeigenschaft versteht (bzw. wenn man die schwache Lesart der Definition Earman's zugrunde legt).

Sehen wir uns an, wie die Argumentationskette dann aussehen müsste:

P1: Determinismus ist eine Doktrin über physikalische Theorien.

P2: Space Invaders sind im Rahmen der Klassischen Mechanik möglich.

P3: Space Invaders verletzen den Determinismus.

C: Die Klassische Mechanik ist nicht deterministisch.

Prämisse 1 ist in diesem Argument wiederum eine Voraussetzung und Prämisse 3 immer noch unproblematisch. Bleibt wieder Prämisse 2, die einer kritischen Prüfung zu unterziehen ist.

4.3.4.1 Der Erhaltungssatz-Einwand

Zwar ist es richtig, dass es in der klassischen Mechanik keine obere Schranke für Geschwindigkeiten gibt, aber es wäre zu fragen, ob es andere Beschränkungen gibt, die die Space Invaders unmöglich machen. Hier denkt man sofort

⁸⁸ Vgl. Earman, S. 35. Dieser Punkt wird auch im siebten Kapitel noch weiter verdeutlicht werden.

an die Erhaltungssätze. Wenn beispielsweise die Gesamtenergie und/oder die Gesamtmasse im Universum Erhaltungsgrößen sind, ist es völlig unmöglich, dass Materie (oder auch Strahlung) aus dem Universum verschwindet oder plötzlich in ihm auftaucht.⁸⁹ Insbesondere wenn man bedenkt, dass Emmy Noether in ihrem berühmten Noether-Theorem zeigen konnte, dass sich die Erhaltungssätze zurückführen lassen auf die Homogenität von Zeit und Raum (d.h. auf die Invarianz der Hamilton-Funktion, die die Gesamtenergie des Systems beschreibt, gegenüber Translationen und Drehungen des Koordinatensystems und Verschiebung des Zeitnullpunktes) liegt die Annahme nahe, dass die Erhaltungssätze fundamental für die gesamte (klassische) Physik sind.⁹⁰ Insbesondere ließen sie sich dann auch direkt mit der Struktur der Newtonschen Raumzeit⁹¹ in Verbindung bringen. Was das Noether-Theorem aber in unserem Zusammenhang tatsächlich leisten kann, werde ich im übernächsten Abschnitt (Abschnitt 4.3.4.3) noch einmal genauer diskutieren.

An dieser Stelle soll indes erst einmal folgenden Gedanken festgehalten werden: Sollte man zeigen können, dass die Erhaltungssätze (im Rahmen der klassischen Physik) für das Universum gelten, so wären die Space Invaders auch kein Problem mehr für den Determinismus der Theorie „Klassische Mechanik“. Natürlich hätte man das eben diskutierte Erhaltungssatzargument auch schon bei der Diskussion der starken Lesart von Earman's Definition ins Spiel bringen können. Nur ist es dort eben auch möglich, das Argument schon einen Schritt früher anzugreifen. Dies ist wichtig, da Earman im Folgenden versucht verschiedene Gegenargumente gegen seine Darstellung auszuhebeln. Ich werde im Folgenden diskutieren, ob ihm das gelingt.

4.3.4.2 Earman's Reaktion

Earman sieht zwei mögliche Einwände gegen das Space-Invaders-Argument. Er diskutiert zuerst die folgende Möglichkeit: Man könnte einfach Grenzbedingungen für die Unendlichkeit errichten, die das Space-Invaders-Verhalten verbieten. Mit den richtigen Grenzbedingungen für die räumliche Unendlichkeit könnte man Space Invaders einfach abblocken. Aber natürlich würde man

⁸⁹ Es ist jedoch möglich, dass *gleichzeitig* Materie (oder Strahlung) aus dem Universum verschwindet und in ihm auftaucht. Vgl. hierzu Abschnitt 4.3.4.4.

⁹⁰ Vgl. hierzu beispielsweise: Gerthsen, Ch.; Vogel, H. (1999): *Gerthsen Physik*, Berlin/Heidelberg/New York: Springer, S. 59f.

⁹¹ Vgl. Kapitel 3.1.

dabei einfach per Verbot bestimmen, was eigentlich die Bewegungsgesetze von selbst leisten sollten. Die Einführung solcher Grenzbedingungen wäre also nicht physikalisch motiviert, sondern völlig ad hoc und so etwas sollte, gemäß gängiger wissenschaftstheoretischer Auffassungen, unter allen Umständen vermieden werden.

Die zweite Möglichkeit, gegen das Space-Invaders-Argument vorzugehen, wäre die Bezugnahme auf zusätzliche Gesetze. So bin ich bei meinem Verweis auf die Erhaltungssätze ebenfalls vorgegangen. Earman wendet in diesem Zusammenhang jedoch das Folgende ein:

„The escape solutions discussed in the preceding section appear to violate conservation of mass and momentum, so in so far as conservation principles are sacred, the escape solutions are physically impossible. Distinguish two principles of conservation of mass: (C1) particle world lines do not have beginning or end points and mass is constant along a world line, and (C2) for all time t_1 and t_2 , the total mass at t_1 = the total mass at t_2 . (C1), I claim is a fundamental principle of classical physics, and it is satisfied even in the anomalous escape solutions. Further, if the laws of motion do not allow escape solutions, then (C1) entails (C2). Some people have been misled into thinking that (C2) is a basic law of classical physics because they have not recognized the possibility of escape solutions.

A similar response is to be made to the invocation of conservation of momentum. Given a system is closed and that the interactions among the particles satisfy certain restrictions, we can prove conservation of momentum as a theorem. But there is not the ghost of a hope of proving or securing conservation of momentum if the system is open. And the question here is precisely that of whether the universe as a whole is an open system.“⁹²

Earman bringt also an dieser Stelle zwei Argumente vor. Sein erstes Argument hebt darauf ab, dass der Massenerhaltungssatz häufig (und zwar auch von den Deterministen) missverstanden wird. Man unterstellt fälschlicherweise, dass Massenerhaltung meint, dass die Gesamtmasse im Universum konstant bleibe. Dies sei jedoch nicht zutreffend und zwar gerade dann nicht, wenn Space Invaders möglich sind. Es gibt zwar einen fundamentalen Massenerhaltungssatz. Dieser besagt aber das, was Earman in (C1) beschreibt, dass nämlich die Masse entlang der Weltlinien der Teilchen eine Erhaltungsgröße ist. Meiner Meinung nach müsste Earman diese Behauptung allerdings noch stärker verteidigen. Er stellt der vermeintlichen Behauptung des Deterministen ((C2) ist fundamental) lediglich eine andere Behauptung ((C1) ist fundamental) gegenüber. An dieser Stelle müsste er erklären, warum seine Behauptung die richtige ist. Dies ist nämlich nicht ohne weiteres klar.

⁹² Earman, S. 38.

Nach diesem, die Massenerhaltung betreffenden, Argumentationsgang präsentiert Earman sein zweites Argument, das die Impulserhaltung betrifft. Der Impulserhaltungssatz gilt, wie alle Erhaltungssätze, nur für abgeschlossene Systeme und es sei gerade die Frage, ob man das Universum als abgeschlossenes System betrachten dürfe. Earman hat natürlich Recht damit, dass die Erhaltungssätze nur für abgeschlossene Systeme gelten. Aber, wie schon erwähnt, legt die mögliche Ableitung der Erhaltungssätze aus fundamentalen Symmetrien von Noether eventuell nahe, dass die Erhaltungssätze aufs Engste mit bestimmten Annahmen über die Struktur der Newtonschen Raumzeit verknüpft sind, welche auch für Earmans Überlegungen grundlegend ist (siehe Kapitel 4.3.4.3).

Außerdem könnte man an dieser Stelle fragen, warum Earman sich auf die Massen- und Impulserhaltung bezieht und nicht auf die Energieerhaltung. Klarerweise verletzen die Space Invaders auch diese. Ich unterstelle zwar, dass Earman der Meinung ist, auch für diesen Fall ein ähnliches Argument wie bei der Impulserhaltung vorbringen zu können, aber ohne weiteres klar ist das natürlich nicht.

Nachdem ich nun dargestellt habe, wie Earman versucht dem zentralen Einwand gegen sein Argument zu begegnen, möchte ich an dieser Stelle noch auf einen weiteren potentiellen Einwand gegen Earmans Argument hinweisen. Man könnte nämlich die Frage stellen, ob es eine physikalisch mögliche Kraftfunktion gibt, die ein Space-Invaders-Verhalten überhaupt erst möglich macht. Dies ist mitnichten eine Trivialität. Allerdings referiert Earman, um diesen Einwand zu entkräften, Ergebnisse von Mather und McGehee (1975) und auch von Gerver (1984).⁹³ Erst diese konnten zeigen, dass es physikalisch mögliche Kraftfunktionen gibt, die ein solches Space-Invader-Verhalten generieren können. Bei Mather und McGehees Beispiel kollidieren die involvierten Massen jedoch.⁹⁴ Gerver entwickelt hingegen zumindest für Punktmassen ein Modell, welches ohne Kollisionen auskommt, um das gewünschte Verhalten zu generieren. Letztlich gelang Xia 1992 der endgültige Beweis, dass es auch für aus-

⁹³ Mather, J.N.; McGehee, R. (1975): „Solutions of the Collinear Four-Body Problem“. In: Moser, J. (Hrsg.): *Dynamical Systems, Theory and Applications*, New York: Springer; Gerver, J.L. (1984): „A Possible Model for a Singularity without Collisions in the Five Body Problem“. In: *Journal of Differential Equations* 52, S. 76-90; vgl. Earman, S. 35 - 37.

⁹⁴ Vgl. zur Kollisionsproblematik Abschnitt 4.2.

gedehnte Massen Nicht-Kollisions-Singularitäten geben kann, wenn man nur die Newtonsche Gravitationskraft zugrunde legt.⁹⁵ (Diesen Beweis konnte Earman als er *A Primer on Determinism* schrieb natürlich noch nicht kennen.) Durch diese Erkenntnisse ist zumindest einem weiteren möglichen Gegeneinwand gegen das Space-Invaders-Szenario vorgebeugt.

Trotzdem bleibt es zweifelhaft, was Earman mit seinem Argument tatsächlich zeigen kann. Wie schon mehrfach betont, scheint das Argument vor dem Hintergrund seiner eigenen Determinismusdefinition nutzlos zu sein. Auch wenn man die Butterfielddefinition zugrunde legt, bleibt die Triftigkeit des Arguments mindestens fragwürdig. Unter dieser Voraussetzung müsste nämlich mehr zum Status der Erhaltungssätze gesagt werden. Diesen Punkt wollen wir im folgenden Abschnitt noch einmal genauer unter die Lupe nehmen.

4.3.4.3 Was kann das Noether-Theorem leisten?

Ich werde in diesem Abschnitt kurz das Noether-Theorem und bestimmte Konsequenzen dieses Theorems für unseren Zusammenhang diskutieren. Dabei werde ich auf die physikalischen Details weitestgehend verzichten und nur auf die für unsere Thematik relevanten Ergebnisse zu sprechen kommen.⁹⁶

Das Noether-Theorem geht auf die Mathematikerin Emmy Noether zurück. In einer allgemeinen Formulierung lautet es:

„Jede einparametrische Schar von Transformationen, unter denen die Wirkung invariant ist, führt zu einer Erhaltungsgröße.“⁹⁷

Im Speziellen bedeutet dies, dass die Invarianz von abgeschlossenen physikalischen Systemen unter der zeitlichen Verschiebung um einen konstanten Betrag t_0 (Homogenität der Zeit), der räumlichen Verschiebung um einen konstanten Vektor \vec{a} (Homogenität des Raums) und der räumlichen Drehung um drei konstante Winkel α_i (Isotropie des Raums) zu bestimmten Erhaltungsgrößen führt. Im Einzelnen resultiert aus der Homogenität der Zeit die Energieerhal-

⁹⁵ Xia, Z. (1992): „The Existence of Noncollision Singularities in Newtonian Systems“, In: *Annals of Mathematics* 135, S. 411-468; vgl. Butterfield, S. 35.

⁹⁶ Für eine genauere Erörterung sei auf das Lehrbuch von Torsten Fließbach zur theoretischen Mechanik verwiesen, an dem ich mich auch in meiner Darstellung orientiere. Vgl. Fließbach, T. (1999): *Lehrbuch zur theoretischen Physik, Band 1: Mechanik*, Heidelberg/Berlin/Oxford: Spektrum Akademischer Verlag, S. 83-90 und S. 117-123.

⁹⁷ Fließbach, S. 117.

tung, aus der Homogenität des Raums die Impulserhaltung und aus der Isotropie des Raums die Drehimpulserhaltung.⁹⁸

Warum könnte das Noether-Theorem für unsere Thematik relevant sein? Die Idee ist die folgende: Earman führt das Space-Invaders-Argument an, um zu zeigen, dass die klassische Mechanik nicht, wie zumeist angenommen, deterministisch ist. Dieses Argument kann man versuchen zu entkräften, indem man die Erhaltungssätze der Physik ins Spiel bringt. Sie gelten in abgeschlossenen Systemen. Sollten die Erhaltungssätze für das Universum gelten, würde das die Existenz von Space Invaders unmöglich machen. Deshalb bezweifelt Earman, dass es sich beim Universum um ein abgeschlossenes System handelt.⁹⁹ Sollte das Universum kein abgeschlossenes System sein, gilt aber natürlich auch das Noether-Theorem nicht, da es gerade nur in abgeschlossenen Systemen gilt. Insofern scheint uns das Noether-Theorem eigentlich gar nicht weiterzuhelfen. Wir haben aber gesehen, dass das Space-Invaders-Argument, wenn überhaupt, nur etwas im Hinblick auf Butterfields Determinismusdefinition zeigt. Butterfields Definition bezieht sich aber ausdrücklich auf abgeschlossene Systeme. Wenn wir darüber hinaus über Modelle der klassischen Mechanik reden, liegt all diesen Modellen die Struktur der Newtonschen Raumzeit zugrunde. In ihr gelten die entsprechenden Symmetrien. Folglich gilt in den Modellen der klassischen Mechanik auch das Noether-Theorem. Damit gelten auch unmittelbar die Erhaltungssätze. Der Determinismus der Systeme der klassischen Mechanik bleibt also vom Space-Invaders-Argument unangetastet, solange man isolierte Systeme betrachtet. Demnach bliebe für einen Vertreter des Space-Invaders-Arguments nur die Rückzugsmöglichkeit darauf, dass man in idealisierten Modellen nicht mehr von abgeschlossenen Systemen reden darf. Ob dies eine attraktive Position ist, halte ich allerdings für äußerst fragwürdig.

4.3.4.4 Synchronisierte Space Escapers und Invaders

Ich möchte an dieser Stelle noch eine weitere denkbare Entgegnung auf den Erhaltungssatz-Einwand diskutieren.¹⁰⁰ Es scheint möglich zu sein, dass ein Space Escaper und ein Space Invader in solch einer Weise synchronisiert auf-

⁹⁸ Vgl. ebd, S. 86 - 89.

⁹⁹ Vgl. Earman, S. 38.

¹⁰⁰ Den Hinweis auf diesen möglichen Gegeneinwand verdanke ich Raja Rosenhagen, M.A. und Dr. Christian Suhm.

treten, dass die Erhaltungssätze nicht verletzt werden. So könnte beispielsweise die Erhöhung der Gesamtmasse oder -energie im Universum aufgrund des Auftauchens eines Space Invaders durch einen Space Escaper ausgeglichen werden, dessen Masse und Energie aus dem Universum verschwinden. Mit dem Auftreten eines Space Invaders wäre dann immer das gleichzeitige Auftreten eines Space Escapers verknüpft.

Zu dieser grundsätzlichen Möglichkeit ist allerdings zweierlei zu sagen: Zum einen kann man fragen, ob es eine hinreichende physikalische Motivation für eine solche Annahme gibt und ob ein solches Verhalten nicht wiederum zu Symmetriebrüchen führen würde, welche mit dem Noether-Theorem nicht vereinbar wären. Zum anderen, und dies ist der viel gewichtigere Einwand, würde eine solche Konstruktion die Reichweite des Space-Invaders-Arguments extrem einschränken. Die Schlagkraft des ursprünglichen Space-Invaders-Arguments bestand gerade darin, dass es im Rahmen der klassischen Mechanik prinzipiell möglich sein sollte, dass in *jedem* beliebigen System Space Invaders auftauchen könnten. Nur deswegen war das Argument so gefährlich für den Determinismus. Wendete man das Argument indes in der gerade beschriebenen Weise, dann beträfe es nur noch eine bestimmte Klasse von Systemen bzw. Modellen. Es beträfe dann nur noch Systeme bzw. Modelle, in denen es Space Escapers gibt. Nur wenn irgendwo ein Space Escaper auftritt, wäre es überhaupt möglich (oder, aufgrund der Erhaltungssätze, sogar gefordert), dass auch ein Space Invader auftaucht. Space Escapers können aber nur auftreten, wenn auf Massen eine Kraft wirkt, die das Space-Escaper-Verhalten herbeiführt. Damit wären nur Systeme, in denen entsprechende Prozesse ablaufen, anfällig für Space Invaders. Man könnte in diesem Fall argumentieren, dass die klassische Mechanik, abgesehen von Systemen mit Space Escapers, immer noch vollkommen deterministisch ist. Völlig analog argumentiert man schließlich auch im Falle von Kollisionen.¹⁰¹

4.4 Die Masse auf der Kuppel

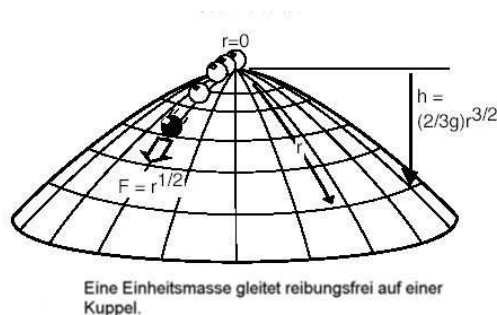
Nachdem wir intensiv ein zentrales, wenn nicht sogar das bedeutendste Argument in der Debatte um den Determinismus in der klassischen Physik erörtert

¹⁰¹ „*Barring collisions, Newtonian gravitational theory of point mass particles is Laplacian deterministic.*“ Earman, S. 31. Vgl. auch: Abschnitt 4.2.

haben, möchte ich noch auf ein weiteres Argument eingehen, das den Determinismus der klassischen Physik herausfordert.

Beschrieben wird das Argument von John D. Norton in dem weiter oben schon angesprochenen Aufsatz *Causation as Folk Science*.¹⁰² Ich werde das Argument im Folgenden als das „Kuppel-Argument“ bezeichnen.

Aus Nortons Aufsatz übernehme ich auch die folgende Abbildung, welche die Situation darstellt, mit der wir uns beschäftigen wollen:



Eine Einheitsmasse gleitet reibungsfrei auf einer Kuppel.

Abbildung 3 (entnommen aus Norton (2003), S. 9).

Die Situation kann wie folgt beschrieben werden: Eine Masse sitzt auf einer Kuppel. Die Kuppel ist rotationssymmetrisch bezüglich des Koordinatenursprungs $r = 0$. Der Koordinatenursprung ist gleichzeitig der höchste Punkt der Kuppel. Es existiert ein abwärts gerichtetes Gravitationsfeld. Unter Beachtung der Geometrie der Kuppel und des Gravitationsfeldes kann man die Höhe h eines Gegenstandes auf der Kuppel mittels der in der Abbildung angegebenen Gleichung beschreiben (g bezeichnet dabei die Erdbeschleunigung). Eine punktförmige Einheitsmasse gleitet auf der Oberfläche der Kuppel reibungsfrei, einzig unter dem Einfluss der Gravitation.

Die Kuppel ist so konstruiert, dass auf die Masse an jedem Punkt der Oberfläche folgende Kraft F tangential zur Kuppeloberfläche wirkt:

$$F = r^{\frac{1}{2}} \quad [8]$$

Benutzt man das zweite Newtonsche Axiom, so erhält man für die (Einheits-)Masse die folgende Bewegungsgleichung:

$$\frac{d^2 r}{dt^2} = r^{\frac{1}{2}} \quad [9]$$

Wir wählen die folgende Anfangsbedingung: Die Masse ruht genau auf dem Gipfel der Kuppel. Wir haben es hier mit einem Anfangswertproblem zu tun,

¹⁰² Vgl. Norton (2003), S. 8-12.

wie es in Abschnitt 4 (S. 36f) beschrieben wurde. Offensichtlich erhalten wir mit den genannten Anfangsbedingungen die folgende Lösung für [9]:

$$r(t) = 0 \quad [10]$$

Dies ist auch genau das, was wir erwarten würden: Die Masse bleibt einfach für immer auf dem Gipfel liegen. Aber leider ist die Lösung von [9] nicht eindeutig. Es gibt noch weitere Lösungen, nämlich für jede radiale Richtung:

$$r(t) = \begin{cases} \frac{1}{144}(t-T)^4 & \text{für } t \geq T \\ 0 & \text{für } t \leq T \end{cases} \quad [11]$$

$T \geq 0$ ist dabei eine beliebige Konstante. Beschreibt man den Inhalt dieser Lösung in Worten, so hat man es hier mit einer Masse zu tun, die auf dem Gipfel der Kuppel sitzt und sich zum Zeitpunkt $t = T$ spontan in irgendeiner radialen Richtung in Bewegung setzt. Man kann weder Ursachen noch Wahrscheinlichkeiten für diese Bewegung bzw. den Zeitpunkt des Beginns dieser Bewegung angeben.¹⁰³

Dies ist augenscheinlich ein Problem für den Determinismus. Es gibt kein Gesetz, das determiniert, nach welcher Zeit T sich die Kugel in Bewegung setzt. Das bedeutet, dass Welten oder Modelle, die bis zum Zeitpunkt T exakt übereinstimmen, es danach nicht mehr tun. In der einen Welt bzw. in dem einen Modell sitzt die Kugel noch bewegungslos auf der Kuppel, in der bzw. dem anderen rollt sie herunter.¹⁰⁴

Allerdings gibt es gegen die in [11] beschriebenen Lösungen einen Einwand. Es scheint nämlich eine physikalische Bedingung zu geben, welche die in [11] dargestellten Lösungen unmöglich macht. Bei dieser Bedingung handelt es sich um das erste Newtonsche Axiom.

Es besagt, dass ein Körper, auf den keine resultierende äußere Kraft einwirkt, seinen Bewegungszustand beibehält, dass er also nicht beschleunigt wird.¹⁰⁵

Auf die Masse, die genau auf dem Gipfel sitzt, wirkt aber keine resultierende Kraft. Die Gravitationskraft wird ja gerade von der Kuppel kompensiert. Was also zuerst als Problem erschien, scheint nun doch keine Schwierigkeit darzustellen.

¹⁰³ Vgl. Norton (2003), S. 9f.

¹⁰⁴ Und selbst in zwei Modellen, in denen die Kugel gleichzeitig losrollt, ist nicht klar, ob sie in beiden Modellen auch in die gleiche Richtung rollt.

¹⁰⁵ Die resultierende äußere Kraft ist die Vektorsumme aller am Körper angreifenden Kräfte.

Norton ist jedoch der Ansicht, dass [11] im Einklang mit Newtons erstem Axiom steht. Er argumentiert dabei folgendermaßen: Für Zeiten größer und kleiner als T gibt es ohnehin kein Problem. Für Zeiten kleiner als T wirkt keine Kraft und die Masse ruht (d.h. sie ändert ihren Bewegungszustand nicht). Für Zeiten größer als T wird die Masse beschleunigt. Allerdings sitzt sie dann ja auch nicht mehr auf dem Gipfel der Kuppel und dementsprechend wirkt auch eine beschleunigende Kraft.

Die entscheidende Frage ist also, was zum Zeitpunkt $t = T$ geschieht. Zu diesem Zeitpunkt ist jede Lösung von [11] null und damit ist die Masse auch unbeschleunigt. Genau dies fordert das erste Newtonsche Axiom: Es wirkt keine Kraft und die Masse ist unbeschleunigt. Trotzdem ist für jedes $t > T$ die Masse beschleunigt und es wirkt eine Kraft. Dies lässt sich einfach aus den Gleichungen ableiten.

Dennoch sind wir aufgrund dieses Resultats irritiert. Woran liegt das? Norton meint, dass die Irritation von unseren starken kausalen Intuitionen herrührt. Er schreibt:

„Our natural causal instinct is to seek the first instant at which the mass moves and then look for the cause of the motion at that instant. We are tempted to think of the instant $t = T$ as the first instant at which the mass moves. But that is not so. It is the *last* instant at which the mass does *not* move. There is no first instant at which the mass moves. The mass moves during the interval $t > T$ only and this time interval has no first instant. (Any candidate first instant in $t > T$, say $t = T + \varepsilon$ for any $\varepsilon > 0$, will be preceded by an earlier one, $t = T + \varepsilon/2$, still in $t > T$.) So there is no first instant of motion and thus no first instant at which to seek the initiating cause.”¹⁰⁶

Dass dieses indeterministische Verhalten der Masse eigentlich gar nicht so ungewöhnlich ist, verdeutlicht Norton dann noch mit einem anderen Argument:¹⁰⁷ Stellen wir uns vor, dass wir die Masse die Kuppel hinaufrollen, indem wir sie unten, am Fuß der Kuppel, einmal anstoßen. Es ist denkbar, dass wir der Kugel dabei exakt die richtige Anfangsgeschwindigkeit verleihen, sodass sie genau auf dem Gipfel der Kuppel zur Ruhe kommt. Ein mögliches Verhalten der ruhenden Masse an diesem Punkt ist, dass sie einfach auf dem Gipfel liegen bleibt. Wenn wir die Trajektorie der Masse betrachten, haben wir es mit der Trajektorie einer Masse zu tun, welche die Kuppel bis zum Gipfel hinaufrollt

¹⁰⁶ Norton (2003), S. 11, Hervorhebungen im Original.

¹⁰⁷ Vgl. ebd.

und dort beliebig lange liegen bleibt. Wegen der Zeitumkehrinvarianz¹⁰⁸ der Newtonschen Mechanik ist auch der zeitumgekehrte Vorgang ein mögliches Modell der Theorie. Dieser zeitumgekehrte Vorgang entspricht aber genau dem Verhalten der Masse, die zuerst auf dem Gipfel ruht und dann plötzlich losrollt. Soweit Nortons Argumentation.

Es scheint so, als beruhe das Argument auf einer Variante von Zenons Paradoxien. Offensichtlich rollt die Masse los, aber es ist unmöglich, den genauen Punkt auszumachen, an dem sie losrollt. Zum Zeitpunkt $t = T$ ruht sie noch und zu jedem späteren Zeitpunkt findet man einen früheren Zeitpunkt, zu dem sich die Masse auch schon bewegt hat.

Darüber hinaus habe ich folgenden Einwand gegen das Argument: Norton verschleiert ein wichtiges Problem, indem er nur über die Beschleunigung und nicht über die Geschwindigkeit der Masse spricht. Wenn nämlich die Masse, solange sie sich auf dem Gipfel befindet, immer unbeschleunigt ist, so kommt ihr (auf dem Gipfel) auch keine Geschwindigkeit zu. Denn ihr Geschwindigkeitsvektor bleibt null, solange die Masse auf dem Gipfel ruht und nie beschleunigt wird. Wie aber soll die Masse jemals den Gipfel verlassen können, wenn ihre Geschwindigkeit auf dem Gipfel immer null ist? Dies erscheint mir unmöglich.

Zwar könnte Norton an dieser Stelle versuchen, das Verhalten der Masse über das Zeitumkehr-Argument zu beweisen. Aber er sagt selbst, dass das Zeitumkehr-Argument das Verhalten der Masse nur plausibel mache, aber nicht beweise.¹⁰⁹

Ich habe an dieser Stelle noch zwei weitere Bedenken gegen das Argument vorzubringen. Diese ergänzen meinen ersten Einwand und könnten für Nortons Argument ebenfalls ein Problem darstellen.

Mein erstes Bedenken betrifft die Art und Weise, wie Norton das erste Newtonsche Axiom anwendet. Er wendet es nämlich immer auf einen bestimmten Zeitpunkt bezogen an.¹¹⁰ Er betrachtet einzelne Zeitpunkte und prüft, ob das erste Axiom verletzt ist, in unserem Fall also, ob die Kugel beschleunigt wird, obwohl keine Kraft wirkt. Nortons Analyse zeigt, dass es keine Verletzung des

¹⁰⁸ Norton spricht in diesem Zusammenhang von der „Zeitreversibilität“ der Newtonschen Mechanik (vgl. Norton (2003), S. 11). Dies ist aber nicht ganz korrekt, wie Kapitel 4.5 dieser Arbeit noch zeigen wird. Deshalb wird hier der Ausdruck „Zeitumkehrinvarianz“ verwendet.

¹⁰⁹ vgl. Norton (2003), S. 11f.

¹¹⁰ Vgl. ebd. S. 10.

ersten Axioms in dieser Form gibt. Ich frage mich allerdings, ob man das erste Newtonsche Axiom überhaupt in der Weise auf einzelne Zeitpunkte anwenden kann. Betrifft das Axiom nicht vielmehr zeitlich ausgedehnte Prozesse, nämlich Bewegungen? Vielleicht stellt Nortons Argument auch „nur“ in Frage, dass wir Bewegungen wirklich treffend durch eine Angabe von Geschwindigkeit und Beschleunigung zu einzelnen Zeitpunkten beschreiben können. Denn dieses Vorgehen führt genau zu dem Paradox, dass wir über eine Kugel reden, die losrollt, obwohl es keinen ersten Zeitpunkt gibt, an dem sie sich in Bewegung setzt.

Mein zweites Bedenken gegen das Argument betrifft wiederum die Energieerhaltung. Die Frage, die sich stellt, ist, ob es einen Zeitpunkt geben muss, an dem sich die Kugel *auf dem Gipfel* der Kuppel bewegt. Mein obiger Einwand war gerade der, dass dies so sein müsse. Allerdings wäre dieser Zeitpunkt wohl die erste Instanz der Bewegung und damit genau die Instanz der Bewegung, die es gemäß Nortons Argumentation gar nicht gibt.¹¹¹ Wenn es diesen Zeitpunkt aber geben muss¹¹², so wäre zu diesem Zeitpunkt die Energieerhaltung verletzt, da die sich bewegende Masse zu diesem Zeitpunkt die gleiche potentielle Energie hätte, wie die auf dem Gipfel ruhende Masse, plus einen Anteil kinetischer Energie, da sie sich ja bewegt. Damit wäre die Energie einer Masse, die sich auf dem Gipfel bewegt, natürlich größer, als die Energie einer Masse, die auf dem Gipfel ruht. Dies wäre eine Verletzung des Energiesatzes, da man wohl berechtigt ist, das System aus Kuppel und Masse als abgeschlossenes System zu betrachten.

Mir erscheint Nortons Argument aufgrund meiner obigen Überlegungen noch unterstützungsbedürftig. Meiner Meinung nach reicht es nicht aus, die Frage danach, ob sich die Masse auf dem Gipfel bewegen muss, um ihn zu verlassen, durch einen Verweis auf unsere irreführenden kausalen Intuitionen wegzudiskutieren.

¹¹¹ Vgl. das Zitat auf S. 55 bzw. Norton (2003), S. 11.

¹¹² Dafür habe ich ja auf der vorherigen Seite (S. 56) argumentiert.

4.5 Reversibilität und Determinismus

Im weiteren Verlauf möchte ich nun kurz einige Aspekte eines Aufsatzes von Keith Hutchison diskutieren, der sich mit der Frage beschäftigt, ob die klassische Mechanik tatsächlich zeitreversibel und deterministisch ist.¹¹³

Tatsächlich ist Hutchisons Hauptaugenmerk die Zeitreversibilität. Da er aber aus seiner Analyse auch interessante Schlüsse bezüglich des Determinismus zieht, sehen wir uns die Grundzüge seiner Argumentation kurz an.

Zunächst einmal muss man sich den Unterschied zwischen reversiblen und irreversiblen Prozessen verdeutlichen. Eine Eisenstange, die an einem Ende heiß und am anderen Ende kalt ist, geht von selbst in einen Zustand über, in dem die gesamte Eisenstange die gleiche Temperatur hat. Dies ist ein klassisches Beispiel für einen irreversiblen Prozess. Als irreversibel gilt er, weil wir nie beobachten, dass der umgekehrte Prozess selbstständig, also ohne nennenswerte Wechselwirkung mit der Umgebung, abläuft.

Die Bewegung eines harmonischen Oszillators hingegen ist ein reversibler Prozess. Eng verbunden mit reversiblen Prozessen ist die Aussage, dass Gleichungen invariant unter Zeitumkehr sind. Damit ist gemeint, dass man wieder Lösungen der Gleichungen erhält, wenn man in ihnen t durch $-t$ ersetzt.

Die Wellengleichung ist beispielsweise invariant unter Zeitumkehr, während es die Diffusionsgleichung oder auch die Bewegungsgleichung eines gedämpften Oszillators nicht sind.

Hutchison schreibt nun:

„Much of the literature [...] insists that if a physical system is being simulated by a classical mechanical model, then the temporal evolution of the model cannot be anything but reversible.“¹¹⁴

Interessanterweise ist die angesprochene Literatur, auf die Hutchison in einer Fußnote verweist, neben Reichenbachs *The Direction of Time*, das uns wohlbekannte Earman-Buch *A Primer on Determinism*.

Hutchison möchte im Folgenden die Behauptung bestreiten, dass alle Modelle der klassischen Mechanik zeitreversibel sind. Er argumentiert so:

¹¹³ Hutchison, K. (1993): „Is Classical Mechanics Really Time-reversible and Deterministic?“. In: *British Journal for the Philosophy of Science* 44; S. 307-323.

¹¹⁴ Hutchison, S. 310.

Ausgangspunkt der Überlegung ist die Bewegungsgleichung des harmonischen Oszillators. Einfache Berechnungen zeigen, dass diese Gleichung reversibel ist. Mit einer leichten Modifikation lässt sich daraus aber eine Bewegungsgleichung für eine irreversible Bewegung gewinnen. Man muss dazu einfach nur die Bewegungsgleichung für einen gedämpften Oszillator betrachten und zwar mit einer Dämpfung, die proportional zur Geschwindigkeit der oszillierenden Masse ist. Berechnet man die Bewegung eines gedämpften Oszillators, so ergibt sich völlig zwanglos eine irreversible Bewegung. Hutchison schreibt dazu:

„The details of this calculations are not controversial, and do not matter here, but their structure is important. Classical mechanics acts as a sort of algorithm, enabling an intelligence capable of solving differential equations, to calculate the full motions in terms of the initial conditions and the forces acting. *Whether the resulting motion is reversible or not depends on the latter, the forces*, part of the specifications of the system, setting out the detail of how its components interact. The algorithm, the mechanics, is quite neutral on reversibility—it is just as compatible with the forces that produce irreversible behaviour as with those that produce reversibility. As a rough rule-of-thumb: the motions will be reversible if the forces depend only on geometric configurations; but when the forces vary with time, or the velocities of the interacting components, then irreversible motion results if the dependence is asymmetric (that is, if replacement of t by $-t$ in the function specifying changes the force acting).“¹¹⁵

Hätten eventuell diese einfachen Überlegungen zur Irreversibilität der klassischen Mechanik schon ausgereicht, um Earman's Space-Invaders-Argument zu entkräften? Für dieses Argument ist es entscheidend, dass die klassische Mechanik zeitsymmetrisch ist. Hutchison weist an dieser Stelle aber nach, dass das nicht zwingend so sein muss.

Allerdings, wenn wir die „Daumenregel“ aus dem obigen Zitat beachten, löst sich dieser Einwand sofort wieder auf. Denn Earman verweist, wie schon erwähnt, auf Aufsätze von Mather und McGehee und auch von Gerver, die sich Gedanken über mögliche Kraftfunktionen machen, die ein Space-Invader-Verhalten generieren können. In beiden Fällen seien nur Newtonsche Gravitationskräfte involviert.¹¹⁶ Die Newtonsche Gravitationskraft ist aber klarerweise zeitunabhängig und hängt nur von der „geometrischen Konfiguration“ ab. Laut Hutchisons „Daumenregel“ wären die Szenarien, auf die Earman verweist, zeitsymmetrisch und das Space-Invaders-Argument bliebe in dieser Hinsicht unangetastet.

¹¹⁵ Ebd., S. 311, Hervorhebung im Original.

¹¹⁶ Vgl. Earman, S. 36f.

Allerdings müsste man bei der Konstruktion des Arguments eine Prämisse abschwächen. Man dürfte nicht mehr argumentieren, dass die gesamte klassische Mechanik zeitsymmetrisch ist, sondern man müsste vielmehr argumentieren, dass in diesem speziellen Fall nur zeitsymmetrische Kraftfunktionen involviert sind. Alternativ könnte man behaupten, dass die gesamte Klassische Mechanik nur die Newtonsche Gravitationskraft kennt. Damit würde man aber sog. phänomenologische Kräfte ausschließen und dies hätte die Konsequenz, dass z.B. unser gedämpfter Oszillator kein System der klassischen Mechanik mehr wäre. Ohne dies hier ausführlich diskutieren zu wollen, behaupte ich an dieser Stelle lediglich, dass ich die letztere Alternative für unattraktiv halte. Man würde damit den Anwendungsbereich der klassischen Mechanik extrem einschränken. Doch kehren wir nun zu Hutchisons Aufsatz zurück. Hutchison hat bisher gezeigt, dass die klassische Mechanik nicht zwangsläufig reversibel (und damit zeitsymmetrisch) ist.

Interessant für unsere Thematik ist nun ein Argument, das Hutchison später in seinem Aufsatz bringt. Dieses Argument geht auf Reichenbach zurück und besagt, dass in jedem System, in dem indeterministische Prozesse auftreten, auch irreversible Prozesse ablaufen müssen. Das Argument ist folgendermaßen aufgebaut¹¹⁷:

Man nehme an, man habe es mit einem System zu tun, das sowohl zeitreversibel als auch indeterministisch ist.

Dass das System nicht deterministisch ist, bedeutet, dass es einen Zustand A gibt, aus dem heraus sich das System (in der Zeit T) in mindestens zwei unterschiedliche Zustände, B und C, bewegen kann. Nun nimmt man an, B* sei der zeitumgekehrte Zustand von B (also der Zustand, in dem die Gesamtkonfiguration des Systems unverändert ist, außer dass im Vergleich zu B alle Geschwindigkeiten umgekehrt sind).

Wenn das System darüber hinaus zeitreversibel ist, gibt es einen Prozess P, der das System aus dem Zustand B* (in der Zeit T) in den Zustand A* bringt (A* ist der zeitumgekehrte Zustand von A).

Wenn das so ist, kann der Prozess P selbst nicht zeitreversibel sein. Denn wenn er es wäre, müsste das System sich verlässlich vom Zustand A in den Zustand B entwickeln, denn genau diese Entwicklung wäre die Zeitumkehr von P. Dies

¹¹⁷ Vgl. Hutchison, S. 319.

kann aber nicht sein, da die zeitliche Entwicklung aus dem Zustand A heraus gerade nicht verlässlich, also nicht deterministisch, sein soll. Postuliert man also für ein System Zeitreversibilität und Indeterminismus, gerät man in einen Widerspruch.

Setzt man diese Überlegungen in Beziehung zum Space-Invaders-Argument, so scheint man noch einen interessanten Einwand gegen die Space Invaders gefunden zu haben.

Das Space-Invaders-Argument scheint nämlich den obigen Widerspruch zu enthalten. Die Möglichkeit von Space Invaders setzt die Zeitsymmetrie der klassischen Mechanik voraus, was bedeutet, dass die Zeitsymmetrie konstitutiv für die Konstruktion des indeterministischen Verhaltens ist.

Hutchison zeigt, dass ein System nicht gleichzeitig zeitreversibel und indeterministisch sein kann. Damit sollte das Space-Invaders-Argument auf einer Unmöglichkeit beruhen und müsste somit falsch sein.

Aber ist das wirklich so? Hutchison hat nur gezeigt, dass die gleichzeitige Annahme von Indeterminismus und *Zeitreversibilität* zu einem Widerspruch führt. Er hat keine Aussage über *Zeitsymmetrie* oder *Zeitumkehrinvarianz* getroffen. Darauf weist er auch in einer Fußnote ausdrücklich hin:

„It is important to observe that this is not an argument against the time-reversal invariance of non-deterministic theories, only against the reversibility of all its processes.“¹¹⁸

Doch wie ist das zu verstehen? Wie ist das Verhältnis zwischen Zeitreversibilität und Zeitumkehrinvarianz? Wie oben erwähnt, behauptet Hutchison zu Beginn seines Artikels, dass das Konzept der Reversibilität eng mit dem Konzept der Zeitumkehrinvarianz verknüpft ist.¹¹⁹

Formal besteht der Unterschied zunächst einmal darin, dass sich Reversibilität und Zeitumkehrinvarianz auf verschiedene Gegenstandsbereiche beziehen. „Reversibel-sein“ ist eine Eigenschaft von (physikalischen) Prozessen, „Zeitumkehrinvariant-sein“ ist eine Eigenschaft von (mathematischen) Gleichungen. Da in der Physik Prozesse mit Hilfe von Gleichungen beschrieben werden, liegt es nahe, anzunehmen, dass reversible Prozesse mittels zeitumkehrinvarianter Gleichungen beschrieben werden.

¹¹⁸ Hutchison, S. 319.

¹¹⁹ Vgl. Hutchison, S. 308.

Hutchisons Argument zeigt nun, dass dieses Verhältnis nicht so einfach ist und dass noch eine dritte Größe das Verhältnis von Reversibilität und Zeitumkehrinvarianz beeinflusst, nämlich der Determinismus. Die Reversibilität eines Prozesses kann gezeigt werden, indem man nachweist, dass der Prozess deterministisch abläuft und dass die Gleichungen, die den Prozess beschreiben zeitumkehrinvariant sind.

Das Space-Invaders-Verhalten ist indeterministisch und kann somit nicht reversibel sein. Bedeutet dies, dass man die zur Konstruktion des Szenarios benötigte Zeitsymmetrie nicht voraussetzen darf? Dies ist nicht der Fall, denn die Zeitsymmetrie hängt nur damit zusammen, ob die Gleichungen zeitumkehrinvariant sind. Hutchisons Argument sagt jedoch nichts darüber aus, ob Indeterminismus und die damit einhergehende Irreversibilität implizieren, dass die Gleichungen nicht zeitumkehrinvariant sein können. Also gelingt es auch auf dieser Ebene nicht, das Space-Invaders-Szenario zu entkräften. Letztlich bleiben also nur die in Abschnitt 4.3 diskutierten Einwände gegen das Szenario bestehen.

Dennoch war die Diskussion von Hutchisons Argumentation an dieser Stelle nicht nutzlos, da sie zum einen zeigt, wie man dem Space-Invaders-Argument nicht beikommen kann. Daher kann man ein weiteres mögliches Gegenargument gegen das Szenario ausschließen.

Zum anderen verdeutlicht Hutchison, dass Determinismus eng mit anderen fundamentalen Konzeptionen in der Physik, wie dem der Reversibilität, verknüpft ist. Er weist nach, dass eine gängige Idealisierung in der Physik, nämlich die Idealisierung bestimmter Prozesse als reversibel, immer impliziert, dass zumindest diese (idealisierten) Prozesse deterministisch sind.¹²⁰

Ich möchte an dieser Stelle noch folgenden, methodischen Hinweis machen: Am Ende dieses Kapitels erfolgt keine Zusammenfassung, da ich die Ergebnisse dieses Kapitels zusammen mit den Erkenntnissen des fünften und sechsten Kapitels in Kapitel sieben zu einem Zwischenresümee zusammenführen werde.

¹²⁰ Wobei man die Frage stellen kann, was dies für reale Prozesse bedeutet. Schließlich gibt es keine realen reversiblen Prozesse. (Man beachte hier: Es gilt zwar, dass ein Prozess irreversibel ist, wenn er indeterministisch ist. Aber es gilt nicht das Umgekehrte, dass nämlich ein Prozess, wenn er irreversibel ist, auch indeterministisch ist.)

5. Thermodynamik

Kehren wir wieder zu John Earman's *Primer on Determinism* zurück. Auch in der Thermodynamik entdeckt Earman Gefahren für den Determinismus.¹²¹ Um die Probleme aufzuzeigen, diskutiert Earman hier die klassische Wärmeleitungsgleichung (in einer Raumdimension). Die Gleichung lautet:

$$\frac{\partial}{\partial t} u(x,t) = \frac{\partial^2}{\partial x^2} u(x,t) \quad [12]$$

Dabei kann $u(x,t)$ beispielsweise die Temperaturverteilung in einem dünnen Stab bezeichnen.

Formuliert man die Frage nach dem Determinismus als Anfangswertproblem, so geht es jetzt darum, eine Lösung $u(x,t)$ für Gleichung [12] zu finden, die den Anfangsbedingungen $u(x,0)$ genügt, und die Eindeutigkeit dieser Lösung zu beweisen.

Die eindimensionale Fundamentallösung dieser Gleichung lautet:

$$u(x,t) = \sqrt{\frac{1}{4\pi t}} \cdot e^{-\frac{x^2}{4t}} \quad [13]$$

Aus dieser Lösung, so argumentiert Earman, kann man ableiten, dass Wärme unendlich schnell geleitet wird. Denn die Exponentialfunktion wird auch für große x niemals null. Wenn wir also z.B. einer Eisenstange am einen Ende eine bestimmte Wärmeenergie „zuführen“, so gibt es einen instantanen Effekt am anderen Ende. Deshalb seien, so Earman, Einflüsse aus der Unendlichkeit eigentlich die Regel. Eine Änderung eines Wärmepotentials wirke sich auf Grund der Struktur der Exponentialfunktion immer auf unendlich weit entfernte Regionen aus. Damit gebe es jedoch keine eindeutige Lösung des Anfangswertproblems, denn Einflüsse aus der Unendlichkeit können nicht ausgeschlossen werden. Und dies sei natürlich ein Problem für den Determinismus.

Man könnte dagegenhalten, dass die Einflüsse aus der Unendlichkeit vernachlässigbar sind, weil die Lösung der Gleichung (die Exponentialfunktion [13]) so schnell so stark abfällt, dass die Eindeutigkeit der Lösung nicht beeinflusst wird. Zumindest könnte man gewisse Bedingungen einführen, die garantieren, dass die Lösung eindeutig bleibt. Earman stellt dann aber zu Recht die Frage,

¹²¹ Das hier diskutierte Argument findet sich bei Earman auf den Seiten 40 - 42.

wie man diese Einschränkungen rechtfertigen kann, und ohne diese Bedingungen müsste man eben sagen, dass auch kleine Einflüsse Einflüsse sind.

Zuletzt sei noch erwähnt, dass das Problem, welches Earman hier aufwirft, nicht nur die Wärmeleitungsgleichung betrifft, sondern alle Differentialgleichungen des gleichen Typs, sog. parabolische Differentialgleichungen.

Allerdings ist Earmans Argumentation hier im Prinzip vollkommen analog zum Space-Invaders-Argument. Das Problem für den Determinismus besteht nämlich letztlich darin, dass man nicht ausschließen kann, dass aus der räumlichen Unendlichkeit plötzlich Wärmeenergie auftaucht und das System beeinflusst. Es handelt sich hier also um eine Variante des Space-Invaders-Arguments. Und somit setzt sich auch dieses Argument den gleichen Einwänden wie das Space-Invaders-Argument aus, also insbesondere dem Energie-satzeinwand.

6. Elektrodynamik

Nicht nur im Bereich der Mechanik und der Thermodynamik gibt es Herausforderungen für den Determinismus, sondern auch die klassische Elektrodynamik birgt Probleme.¹²²

Bei Quellenfreiheit lauten die Maxwellgleichungen im leeren Raum:

$$\nabla \times E = -\frac{1}{c} \frac{\partial B}{\partial t} \quad [14]$$

$$\nabla \times B = \frac{1}{c} \frac{\partial E}{\partial t} \quad [15]$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad [16]$$

$$\nabla \cdot E = 0 \quad [17]$$

Da wir uns hier mit klassischer Physik beschäftigen wollen, legen wir unseren Überlegungen zugrunde, dass es ein spezielles Bezugssystem, den absoluten Raum, gibt. (Wir müssen allerdings nicht postulieren, dass der absolute Raum mit einem Stoff, dem Äther, gefüllt ist.)

Das bedeutet dann, dass sich Lichtwellen mit der Geschwindigkeit c relativ zum absoluten Raum ausbreiten und mit der Geschwindigkeit $v \pm c$ in einem Bezugssystem, das sich relativ zum absoluten Raum mit der Geschwindigkeit v bewegt. (Dies widerspricht natürlich den Erkenntnissen der modernen Physik, aber stellen wir uns dennoch vor, es sei so.)

Wenn dies so ist, so Earman, haben wir es mit einem Beispiel für Determinismus zu tun. Kennt man die Werte von E und B zu einem Zeitpunkt, so kann man mittels der Gleichungen [14] und [15] die zukünftigen Werte von E und B berechnen. Gleichzeitig garantieren [14] und [15] dafür, dass die Gleichungen [16] und [17] nicht verletzt werden, solange sie bei den Anfangsbedingungen auch nicht verletzt sind.

Allerdings gelten die Maxwellgleichungen, so wie sie oben formuliert sind, nur für den quellenfreien Raum. Wenn wir auch Quellen (und Senken) zulassen, müssen wir die Gleichungen [15] und [17] in der folgenden Weise modifizieren:

$$\nabla \times B = \mu_0 j + \frac{1}{c} \frac{\partial E}{\partial t} \quad [18]$$

¹²² Vgl. zum Folgenden Earman, S. 47f.

$$\nabla \cdot E = \frac{\rho}{\varepsilon} \quad [19]$$

Mit der Formel für die Lorentzkraft wird dann die Elektrodynamik als physikalische Theorie komplettiert.

Earman sagt nun, dass sich aus diesem neuen Formalismus ein sachgemäß gestelltes Anfangswertproblem ergebe, solange sich Ladungen mit subluminaren Geschwindigkeiten bewegen, also mit Geschwindigkeiten, die kleiner sind als die Lichtgeschwindigkeit.

Es gebe aber nichts im Formalismus der klassischen Elektrodynamik, das die Existenz geladener Tachyonen ausschließe. Tachyonen sind (hypothetische) Teilchen, die sich mit Überlichtgeschwindigkeit bewegen.

Earman behauptet nun, dass es eine offene Frage sei, ob sich für Tachyonen überhaupt ein kohärentes Anfangswertproblem finden lasse. Falls sich eins finden sollte, wäre zu überlegen, ob es für das Anfangswertproblem Lösungen gibt, bei denen die Tachyonen so beschleunigt werden, dass sie aus dem Universum verschwinden.

Jeder der beiden Fälle ist für den Determinismus problematisch. Lässt sich kein kohärentes Anfangswertproblem formulieren, so kann man nicht ohne weiteres nachprüfen, ob die zeitliche Entwicklung eines Systems eindeutig festgelegt ist. Gibt es Tachyonen, die aus dem Universum verschwinden können, so gibt es auch tachyonische Space Invaders. Damit ist aber der entscheidende Teil des Arguments wiederum vollkommen analog zum Space-Invaders-Argument für die Mechanik.

Earman diskutiert noch kurz den folgenden Rettungsversuch: Man könne versuchen die Theorie so zu modifizieren, dass es ausgeschlossen sei, dass geladene Partikel von subluminaren zu superluminaren Geschwindigkeiten übergehen. Aber dies sei zum einen problematisch, da jeder Versuch einer solchen Modifikation, laut Earman, immer ein Schritt in Richtung Relativitätstheorie sei. Qua Voraussetzung wollen wir uns aber an dieser Stelle mit klassischer Elektrodynamik beschäftigen. Zum anderen wäre eine solche Modifikation nicht hinreichend, da es auch Tachyonen geben könne, die sich schon immer in einem Bewegungszustand mit superluminarer Geschwindigkeit befunden haben.

Allerdings muss man letztlich festhalten, dass das hier diskutierte Tachyonen-Argument im Kern auch wieder analog zum Space-Invaders-Argument ist. Die

Theorie lasse das Verschwinden und Auftauchen von Tachyonen im Universum zu. Somit setzt es sich ebenfalls den gleichen Kritikpunkten aus, die schon beim Space-Invaders-Argument diskutiert wurden.

7. Zwischenstand

Wir haben uns bis hierhin einen Überblick über den Status des Determinismus in der klassischen Physik verschafft. Dabei sind wir nicht zufällig hauptsächlich den Spuren von John Earman's Argumentation gefolgt. Die besondere Bedeutung von Earman's Arbeit offenbart sich nicht nur im Umfang und der Qualität seiner Analyse, sondern auch in der Tatsache, dass er für andere Autoren derjenige ist, der das Referenzwerk für unsere Thematik verfasst hat. Beispielsweise schreibt Carl Hoefer:

„John Earman's *Primer on Determinism* (1986) remains the richest storehouse of information on the truth and falsity of determinism in various physical theories, from classical mechanics to quantum mechanics and general relativity.“¹²³

Auch Jeremy Butterfield sieht dies ähnlich:

„The Philosopher who has done the most to classify physical theories in this way is Earman (1986) [...]“¹²⁴

Wir haben uns also angesehen, welche Argumente das zentrale Referenzwerk für unsere Thematik vorbringt, um die Auffassung in Frage zu stellen, dass die klassische Physik vollkommen deterministisch sei.

Earman diskutiert dabei drei Disziplinen der klassischen Physik: die Mechanik, die Thermodynamik und die Elektrodynamik. In all diesen Disziplinen ist der Determinismus für Earman mehr als fragwürdig. Ausschlaggebend ist für ihn dabei insbesondere das Space-Invaders-Argument, das die klassische Mechanik betrifft. Seine Argumente, die die Thermodynamik bzw. Elektrodynamik betreffen, funktionieren im Kern ganz ähnlich und stellen insofern letztlich keine neuen Argumente dar.

Earman selbst fasst die Ergebnisse seiner Analyse der klassischen Physik folgendermaßen zusammen:

„The principal irritant derives from the possibility of arbitrarily fast causal signals, threatening to trivialize domains of dependence. It is not surprising, therefore, to find non-uniqueness for the initial value problem for some of the most fundamental equations of motion of classical physics, both for cases of discrete particles (ordinary differential equations) and for continuous media or fields (partial differential equations).“

¹²³ Hoefer.

¹²⁴ Butterfield, S. 35.

Whether such non-uniqueness entails the falsity of determinism is a difficult and delicate question, turning in large part on the status of supplementary conditions that might be imposed on the problem.¹²⁵

Gehen wir auf den letzten Aspekt ein. Versteht man die Frage nach dem Determinismus als mathematisches Anfangswertproblem, so ist klar, dass es nicht zwingend ein Problem für den Determinismus ist, wenn das Anfangswertproblem keine eindeutige Lösung hat. Denn es kann zusätzliche Bedingungen geben, die dafür sorgen, dass nur eine der Lösungen zulässig ist. An dieser Stelle müsste man also klären, welchen Status diese einschränkenden Bedingungen haben. Es stellt sich in diesem Zusammenhang die Frage, ob man für die einschränkenden Bedingungen physikalische Gründe anführen kann. Sollte dies so sein, wäre ihr Status wahrscheinlich wenig problematisch. Anders verhielte es sich, wenn die Bedingungen nur ad hoc eingeführt würden, um unerwünschte Ergebnisse auszuschalten. Solche Einschränkungen müsste man dann in Frage stellen. Allerdings trifft Earman an dieser Stelle keine genaue Aussage darüber, wie bei der Bewertung solcher einschränkenden Bedingungen vorgegangen werden kann oder sollte.

Auf diesen Gesichtspunkt wird gleich, in etwas abgewandelter Weise, noch genauer eingegangen werden, doch sehen wir uns zuerst ein weiteres Zitat an, in dem Earman sich zu seinen Ergebnissen bezüglich der klassischen Physik äußert:

„Though they are perhaps obvious, there are two other points worth emphasizing. First, the trials and tribulations determinism is forced to undergo in classical physics are purely ontological. None of the ones I have described above derive from epistemological considerations, such as the ability of observers, embodied or disembodied, smart or dumb, to access and process information about the universe. Second, despite the residual and irremediable vagueness in the ontological doctrine of determinism, the threats discussed above are sharp enough to be recognizable threats.“¹²⁶

Für Earman ist es eine ausgemachte Sache, dass Probleme, die er für den Determinismus in der klassischen Physik aufzeigt, rein ontologische Probleme sind. Seine Begründung hierfür ist, dass er an keiner Stelle seiner Argumentation auf die epistemischen Fähigkeiten eines Beobachters rekurrieren musste. Dies mag zwar richtig sein, allerdings redet Earman über klassische physikalische Theorien (klassische Mechanik, Thermodynamik, klassische Elektrody-

¹²⁵ Earman, S. 52f.

¹²⁶ Ebd., S. 53.

namik) und damit über Theorien, die im strengen Sinne falsch sind. Anhand dessen kann er keine Aussagen über den Determinismus oder Indeterminismus unserer Welt treffen. Dass er dieses Ziel verfolgt, liegt jedoch nahe, sofern man der starken Lesart seiner Determinismusdefinition folgt. Er spricht in seiner Argumentation aber nur über Theorien und über deren Ontologie und nicht über die aktuelle Welt und deren Ontologie. Auf diesen Gesichtspunkt habe ich bereits bei der Diskussion des Space-Invaders-Arguments hingewiesen.¹²⁷ Im Hinblick auf die starke Lesart seiner Definition erscheint sein Vorgehen insbesondere deswegen problematisch, weil in allen Argumenten entweder unbegrenzte Geschwindigkeiten (Space Invaders, Tachyonen) oder unendlich schnelle kausale Beeinflussung (Wärmeleitungsgleichung) eine entscheidende Rolle spielen, also gerade Dinge, die von unseren modernen physikalischen Theorien, in diesem Fall der Relativitätstheorie, ausgeschlossen werden.

Hier ist der Punkt, an dem man auf die zuvor diskutierten einschränkenden Bedingungen für Anfangswertprobleme zurückkommen kann. Bestimmte Einschränkungen mögen vielleicht aus der klassischen Perspektive heraus nicht weiter gerechtfertigt sein, erscheinen aber aus einer anderen Perspektive, nämlich aus der Perspektive modernerer Theorien, ganz einsichtig.

Unabhängig davon bleibt abschließend festzuhalten, dass die Wahrheit des Determinismus als Doktrin über unsere Welt durch Earmans Argumentation nicht in Frage gestellt wird. Denn man kann mittels streng genommen falscher Theorien einfach keine Aussagen über unsere Welt treffen.¹²⁸

Anders verhält sich die Angelegenheit, wenn man Determinismus als Eigenschaft von Theorien versteht. Auch dieser Punkt ist schon bei der Diskussion der Space Invaders angesprochen worden.¹²⁹ Wenn Earmans Argumente triftig sind, so kann er zeigen, dass die klassischen Theorien indeterministisch sind. Dies wäre auch ein interessantes Ergebnis, da es der allgemeinen Ansicht widersprechen würde, die besagt, die klassischen physikalischen Theorien seien geradezu Paradebeispiele für deterministische Theorien. Aber auch hier ist, wie wir festgestellt haben, Vorsicht geboten. Alle Argumente Earmans verletzen die Erhaltungssätze. Man muss sich also die Frage stellen, wie fundamental die Erhaltungssätze in der klassischen Physik sind und ob man gute Gründe dafür

¹²⁷ Vgl. Abschnitt 4.3.3.

¹²⁸ Diese Problematik wird uns im zehnten Kapitel dieser Arbeit noch einmal beschäftigen.

¹²⁹ Vgl. Abschnitt 4.3.4.

hat, die Erhaltungssätze als einschränkende Bedingungen anzuerkennen. Insbesondere das Noether-Theorem lässt auf einen fundamentalen Status der Erhaltungssätze schließen und deutet eine enge Verknüpfung der Erhaltungssätze mit der Struktur der Newtonschen Raumzeit an. Die Newtonsche Raumzeit selbst ist natürlich für die klassische Physik fundamental. Damit ist sie aber auch für Earman's eigene Argumente eine unhintergehbare Basis. Ob dieser Einwand jedoch wirklich ausreicht, um Earman's Argumentation auf der Theorieebene zu entkräften, kann ich an dieser Stelle nicht endgültig absehen. Er reicht aber zumindest aus, um zu zeigen, dass das Space-Invaders-Argument nicht in Systemen gelten kann, in denen die Erhaltungssätze gelten. Solche Systeme werden aber zumeist in den (idealisierten) Modellen der klassischen Mechanik betrachtet.¹³⁰

Zusammenfassend kann man also festhalten, dass Earman's Argumente gegen die Wahrheit des Determinismus in unserer Welt nichts austragen und höchstens auf der Theorieebene den Determinismus in der klassischen Physik fragwürdig machen. Aber auch dies bleibt, wie gesehen, zweifelhaft.¹³¹

Des Weiteren habe ich im Vorangegangenen John Nortons Kuppel-Argument diskutiert. Es scheint ein starkes Argument gegen den Determinismus der klassischen Physik zu sein. Allerdings erweist sich es sich bei genauerer Überprüfung als nicht vollkommen überzeugend.¹³²

Darüber hinaus habe ich anhand eines Aufsatzes von Keith Hutchison das Verhältnis von Determinismus, Zeitreversibilität und Zeitumkehrinvarianz genauer untersucht. Die vielleicht interessanteste Erkenntnis dieser Analyse war, dass es einen engen Zusammenhang zwischen diesen drei Konzepten gibt. Insbesondere stellt sich heraus, dass alle indeterministischen Prozesse zumindest irreversible Teilprozesse haben müssen und dass alle reversiblen Prozesse deterministisch sein müssen.

Kurz erwähnen möchte ich zum Ende dieses Abschnitts noch die Debatte um die sog. „Supertasks“, um die Gruppe von möglichen Argumenten gegen den Determinismus der klassischen Physik zu komplettieren. Die Supertask-

¹³⁰ Auch die Konstruktion von synchronisierten Space Escapers und Invaders bietet hier keinen befriedigenden Ausweg. Vgl. Abschnitt 4.3.4.4.

¹³¹ Vgl. Abschnitt 4.3.4.

¹³² Vgl. Abschnitt 4.4.

Debatte ist eine Debatte, die für unser Thema auch eine Rolle spielt, auf die ich aber in dieser Arbeit nicht weiter eingehe.

Unter einer Supertask versteht man eine Sequenz von unendlich vielen Aktionen oder Operationen, die in einer endlichen Zeit ausgeführt werden.¹³³ In der Physik kann man in diesem Zusammenhang beispielsweise bestimmte Kollisionen unendlich vieler Punktmassen betrachten. Es gibt Supertasks die Systeme der Newtonschen Physik zu sein scheinen und die den Determinismus verletzen. Allerdings verletzen solche Supertasks wiederum die Energieerhaltung und es gibt einen Streit darüber, welche Konsequenzen dies hat. John Earman und John Norton sehen darin ein Problem sowohl für den Determinismus und die Energieerhaltung in der Newtonschen Physik. Joseph Alper und Mark Bridger hingegen argumentieren dafür, dass es gute Gründe gibt, solche Systeme nicht als Systeme der klassischen Newtonschen Physik anzusehen.¹³⁴ Wir haben hier also noch ein weiteres potentiell Problem für den Determinismus in der klassischen Physik. Da aber offensichtlich nicht klar ist, ob die entsprechenden Systeme wirklich Systeme der klassischen Physik sind, habe ich die entsprechende Thematik in dieser Arbeit, abgesehen von diesem kurzen Hinweis, außen vor gelassen.

¹³³ Vgl. hierzu: Laraudogoitia: J. P. (2004): „Supertasks“; in: *Stanford Encyclopedia of Philosophy*, <http://plato.stanford.edu/entries/spacetime-supertasks/>, Stand: 01.03.2006.

¹³⁴ Vgl. hierzu: Alper, Joseph S.; Bridger, Mark; Earman, John; Norton, John (2000): „What is a Newtonian System? The Failure of Energy Conservation and Determinism in Supertasks“. In: *Synthese* 124, S. 281-293.

8. Nichtlineare Physik und Chaos

Man könnte auch versuchen Determinismus negativ zu bestimmen, indem man sich mögliche Gegenbegriffe ansieht, die etwas darüber sagen, was Determinismus gerade *nicht* ist.

Ein solcher Gegenbegriff zu „deterministisch“ (neben vielen anderen) könnte der Begriff „chaotisch“ sein. In der Physik spricht man von der sog. Chaostheorie. Ist es denkbar, dass es in dieser Chaostheorie indeterministisch zugeht? Zumindest würde das allgemeine Verständnis des Begriffs das nahe legen.

Doch bevor wir weiter spekulieren, sehen wir uns lieber genauer an, was unter nichtlinearer Physik bzw. Chaosphysik zu verstehen ist. Erst, wenn wir eine solche Grundlage geschaffen haben, können wir uns unserem eigentlichen Ziel zuwenden, nämlich der Beantwortung der Frage, welche Auswirkungen und Konsequenzen die Erkenntnisse der nichtlinearen Physik für den Determinismus haben.

8.1 Nichtlineare Physik – ein Beispiel: das Wetter

Um in zentrale Probleme der nichtlinearen Physik einzuführen, möchte ich mit einem (geradezu paradigmatischen) Beispiel für ein chaotisches System beginnen:

E.N. Lorenz hatte 1960 am Massachusetts Institute of Technology ein Modell entwickelt, anhand dessen er das Wetter und seine Dynamik studieren wollte.

Mittels eines Systems von zwölf nichtlinearen Differentialgleichungen konnte er die Dynamik von Windströmungen, sowie die Entwicklung von Tief- und Hochdruckgebieten simulieren.¹³⁵

An einem Wintertag 1961 wollte Lorenz eine längere Datensequenz betrachten. Er ließ sich die entsprechenden Daten vom Computer ausdrucken. Dabei begann er zur Abkürzung mit Daten irgendwo in der Mitte des Systems, die seinem letzten Ausdruck entsprachen.

Als Lorenz nach einiger Zeit seinen neuen Ausdruck mit dem alten verglich, musste er feststellen, dass schon nach kurzem Verlauf beide Ausdrücke einen völlig unterschiedlichen Wetterverlauf zeigten.

¹³⁵ Vgl. Bartels, S.127f.

Dies erschien Lorenz unmöglich zu sein und so dachte er zuerst an einen Fehler im Computerprogramm oder in der Hardware des Computers. Diese Möglichkeit musste er aber nach eingehender Prüfung verwerfen und Lorenz fand schließlich heraus, dass die Ursache dieser Entwicklung war, dass er gegenüber des ursprünglichen Zahlenwertes drei Dezimalstellen eingespart hatte. Eine solch geringfügige Abweichung entsprach in Lorenz Gleichungen in etwa einem leichten Windstoß.

Sollte wirklich dieser leichte Windstoß für einen grundsätzlich anderen Verlauf des Wetters verantwortlich sein?

Letztlich muss man dies bejahen. Unter dem Namen „Schmetterlingseffekt“ wurde das geschilderte Phänomen quasi zum (allerdings allzu oft missverstandenen¹³⁶) Paradigma der sog. Chaosforschung.

Aber was ist Chaos? Was hat es mit Nichtlinearität auf sich? Wie werden seltsam anmutende nichtlineare Effekte physikalisch fassbar?

Diesen Fragen wollen wir im Folgenden nachgehen (an einfacheren und übersichtlicheren Fällen, als dem hochkomplexen Wettergeschehen).

8.2 Ein Weg ins Chaos: die Dynamik einer Population nach Verhulst

8.2.1 Die logistische Gleichung

Wir wollen die Dynamik einer Population von Lebewesen in einem begrenzten Gebiet betrachten. Der Anschaulichkeit wegen nehmen wir an, es handle sich um die Zahl der Möwen auf Helgoland (so wie es Günter Küppers in seinem schon früher zitierten Aufsatz ebenfalls tut¹³⁷).

Bei dieser Betrachtung vernachlässigen wir Wanderbewegungen von Möwen von und nach Helgoland. Wir gehen des Weiteren davon aus, dass die Möwen sich nicht kontinuierlich über das Jahr vermehren, sondern in Schüben, d.h. jedes Jahr im Frühling wird eine neue Möwengeneration ausgebrütet. Zu einem bestimmten Zeitpunkt in jedem Jahr bestimmen wir die Anzahl der Möwen. Es erscheint plausibel, davon auszugehen, dass die Anzahl der Möwen im aktuellen Jahr vom Bestand des Vorjahres abhängt. Viele Möwen bedeuten viele Nachkommen, nur wenige Möwen können auch nur wenige Junge bekommen.

¹³⁶ Worin die Missverständlichkeit liegt, wird noch zu diskutieren sein (vgl. Abschnitt 8.3.1).

¹³⁷ Die gesamte Darstellung des Szenarios orientiert sich an Küppers Aufsatz; vgl. Küppers, S. 161-168.

Dies bedeutet: Die mathematische Methode, die hier Anwendung findet, ist die Rekursion. Man nimmt einen Ausgangswert X_0 und berechnet daraus durch eine Abbildung den Folgewert X_1 , der dann selbst wiederum Berechnungsgrundlage für den nächsten Wert X_2 wird. Man erhält auf diese Weise eine Reihe von Werten, die den Verlauf des betrachteten Prozesses widerspiegelt, also hier die Entwicklung der Möwenpopulation.

Die Möwenpopulation ist mithin eine Funktion der Population des Vorjahres. Zusätzlich wird ein weiterer Parameter P eingeführt, der Umwelteinflüsse repräsentiert, die das Verhältnis zweier aufeinander folgender Populationen beeinflussen. Somit gilt:

$$X_{n+1} = f(X_n, P) \quad [20]$$

Kennt man nun die Rechenvorschrift, die durch f vorgegeben wird, so kann man ganz einfach die Entwicklung der Möwenpopulation auf Helgoland berechnen.

Wir machen die folgenden weiteren Annahmen, um f bestimmen zu können:

Der Bestand eines Jahres soll proportional zu dem des Vorjahres sein. Wir wählen dabei P als einen variablen Proportionalitätsfaktor, der, wie gesagt, Umwelteinflüsse, wie Klima oder Nahrungsmittelangebot, repräsentiert. Es gilt also:

$$X_{n+1} = P \cdot X_n \quad [21]$$

Es ist einsichtig, dass die Größe von P entscheidend für die Entwicklung der Population ist. Ist P kleiner als 1, so stirbt die Population aus. Wenn jedoch P größer als 1 ist wird sie unendlich groß. Allerdings ist nachvollziehbar, dass dies kein realistisches Szenario ist. Vielmehr muss man die Begrenztheit der materiellen Ressourcen bedenken. Es wird also irgendwann zu einer Sättigung kommen und die Population wird einen kritischen Wert dauerhaft nicht überschreiten.

Diesen Sachverhalt können wir mathematisch derart fassen, dass wir einen *nichtlinearen Term* $P \cdot X_n^2$ hinzufügen. Wir erhalten also:

$$X_{n+1} = P \cdot X_n (1 - X_n) \quad [22]$$

Das ist die Funktionsgleichung einer Parabel mit den Nullstellen 0 und 1 und dem Maximum $(\frac{1}{2} | \frac{1}{4} P)$. Diese Parabel ist der geometrische Ort aller Übergän-

ge $X_n \rightarrow X_{n+1}$. Man bezeichnet die zugehörige Gleichung als *logistische Gleichung*.

8.2.2 Die langfristige Entwicklung der Population

Wir wollen aber nicht nur die Entwicklung der Population von einem Jahr zum nächsten betrachten, sondern uns interessiert vielmehr, wie sich die Population langfristig entwickelt. Wir gehen dabei von konstanten Umweltbedingungen, also $P = const$, und von einem beliebigen Anfangswert aus. Daraus berechnen wir die Abfolge der X_n . Diese Berechnung soll anhand der folgenden Abbildungen „graphisch“ erfolgen.

In der Abbildung sind die X_{n+1} gegen die X_n aufgetragen. Man erkennt die besprochene Parabel. Außerdem ist die Diagonale $X_n = X_{n+1}$ eingezeichnet.

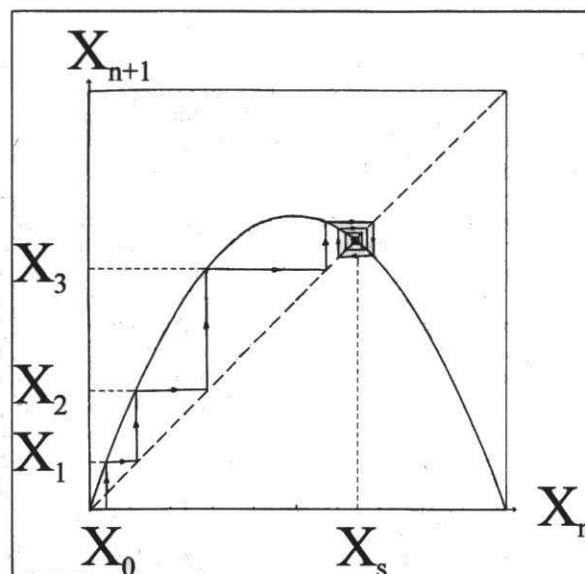


Abbildung der logistischen Gleichung.

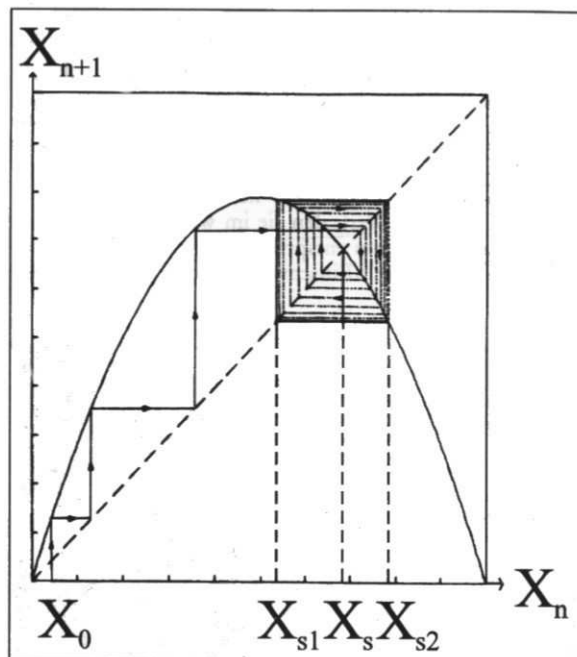
Abbildung 4 (entnommen aus: Küppers, S. 163).

Man geht nun in der folgenden Weise vor: Man wählt einen Startwert X_0 und bestimmt den Folgewert X_1 indem man den durch die logistische Gleichung zugeordneten Funktionswert, also den entsprechenden Wert auf der Parabel, nach links auf die X_{n+1} -Achse projiziert. Diesen Wert benutzt man dann als neuen Startwert indem man ihn über die Diagonale auf die X_n -Achse spiegelt. Nun kann man auf die gleiche Weise aus diesem Wert den entsprechenden Folgewert bestimmen, usw.

Wie man sieht, läuft die Entwicklung in wenigen Schritten auf den Punkt X_s zu. Dieser Punkt ist der Schnittpunkt der Parabel mit der Diagonale. Da hier $X_n = X_{n+1}$ ist, wird der Wert X_s im Folgenden immer wieder reproduziert. X_s wird *Fixpunkt* oder stationärer Zustand genannt.

Es ist einsichtig, dass dieser Fixpunkt stabil ist, denn bei kleinen Störungen läuft die Entwicklung wieder in ihn zurück. Deswegen wird ein solcher Fixpunkt auch *Attraktor* genannt.

Vergrößert man P , ändern sich also die Umwelteinflüsse, so schneiden sich Diagonale und Parabel an einer anderen Stelle. Dadurch ändert sich auch der Winkel, den beide Graphen am Schnittpunkt bilden. Wird der Winkel größer als 90° , so ist der Schnittpunkt instabil und das dynamische Verhalten ändert sich. Die Dynamik läuft jetzt nicht mehr auf einen Punkt zu, sondern sie springt zwischen den Werten X_{s1} und X_{s2} hin und her (siehe Abbildung 5).



Periodische Lösung der logistischen Gleichung.

Abbildung 5 (entnommen aus: Küppers, S. 165).

Man kann nun P noch weiter vergrößern. Bei $P=3,449$ passiert wieder etwas Neues¹³⁸: Die Periode verdoppelt sich, die Dynamik springt zwischen vier Werten. Erhöht man P noch weiter, springt sie bald zwischen 8, 16,... Werten.

¹³⁸ Vgl. hierzu: Gerthsen, S. 980.

Der entscheidende Punkt ist, dass die Verdopplung der Perioden bei immer kleineren Veränderungen von P eintritt.

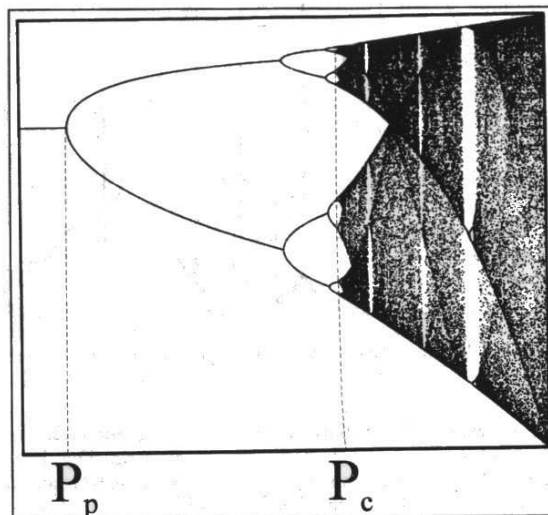
Bei $P=3,59$ „bricht das vollendete Chaos aus“¹³⁹. Die Dynamik springt in einem Bereich, der sich mit wachsendem P immer mehr erweitert, völlig irregulär zwischen allen möglichen Werten hin und her.

Man kann also drei verschiedene Fälle unterscheiden. Welcher Fall eintritt, hängt von der Größe von P ab.

Im ersten Fall ($P < P_p$) pendelt sich die Population nach einer gewissen „Einschwingzeit“ auf einen konstanten Wert ein, der in der Folgezeit nur noch reproduziert wird. Dies ist der *stationäre Fall*.

Im zweiten Fall ($P_p < P < P_c$) erhalten wir periodische Lösungen mit unterschiedlicher Periodizität. Der Wechsel der Perioden hängt dabei immer empfindlicher von der Veränderung von P ab, d.h. die P -Bereiche in denen eine 2^n -Periodik herrscht, werden immer kürzer. Näherungsweise werden sie immer um den Faktor 4,669 kürzer. Dieser Faktor ist die sog. Feigenbaumzahl. Dieser Fall ist also der *periodische Fall*.

Schließlich findet der Übergang ins Chaos statt. Dies ist der dritte Fall ($P > P_c$), der *chaotische Fall*. Die drei Fälle sind in Abbildung 6 noch einmal graphisch dargestellt.



Übergang von Ordnung in Chaos.

Abbildung 6 (entnommen aus Küppers, S. 166).

¹³⁹ Gerthsen, S. 980.

Das soeben beschriebene Szenario ist ein sog. *Feigenbaumszenario*. Die besondere Bedeutung des Feigenbaumszenarios liegt darin, dass es nicht nur für diesen speziellen Fall einer Populationsdynamik gilt, sondern dass sich verschiedenste Vorgänge aus unterschiedlichsten Bereichen so verhalten. Mathematisch liegt dies daran, dass in sehr vielen unterschiedlichen Fällen die zugehörigen Funktionsgraphen parabelähnliche Bögen bilden.

8.3 Kennzeichen nichtlinearer chaotischer Systeme

8.3.1 Sensitive Abhängigkeit von den Anfangsbedingungen

Was ist nun das Besondere an dem besprochenen dritten Fall, dem chaotischen Fall? Warum unterscheidet er sich grundsätzlich von den ersten beiden?

Der stationäre und der periodische Fall sind beide berechenbar. Man kann daher die Entwicklung der Möwenpopulation vorhersagen. Man kann auch prognostizieren, wie sich Veränderungen der Umwelt oder externe Eingriffe in die Population auswirken werden.

Genau dies ist im dritten Fall nicht mehr möglich. Es lassen sich keine Vorhersagen über die zukünftige Entwicklung der Population mehr treffen. Die Werte springen irregulär und folgen scheinbar keiner Regel. Selbst kleinste Veränderungen in der Population oder den Umweltbedingungen führen zu einer ganz anderen Folge von Bestandszahlen. Das System ist äußerst empfindlich gegenüber kleinsten Störungen (also z.B. auch gegenüber Rundungsfehlern bei der Berechnung).

Diese Empfindlichkeit bezeichnet man als *sensitive Abhängigkeit von den Anfangsbedingungen*. Sie ist ein Kennzeichen chaotischer Systeme.

Wichtig, insbesondere für unsere Thematik, ist allerdings die Tatsache, dass es sich hierbei dennoch um sog. *deterministisches Chaos* handelt. Inwiefern ist diese Bezeichnung gerechtfertigt? Jedes X_{n+1} ist streng durch seinen Vorgänger X_n bestimmt. Steht der Vorgänger fest, dann auch sein Nachfolger und damit im Prinzip auch jeder weitere Nachfolger. Insofern ist der ablaufende Prozess deterministisch.

Dennoch gibt es keine Möglichkeit, das Verhalten des Systems vorauszusagen. Es gibt keinen kürzeren Weg, das Verhalten der Dynamik zu beschreiben, als eben diese Dynamik selbst. Andreas Bartes spricht in diesem Zusammenhang

von der „Nicht-Kompressibilität“¹⁴⁰ der Information, die die zeitliche Entwicklung des Systems enthält.

Von hier aus wird das verblüffende Ergebnis, zu dem Lorenz' Wetterberechnungen führten, verständlich. Auch die von Lorenz untersuchte Dynamik ist eine chaotische und der sog. „Schmetterlingseffekt“ ist eine Popularisierung der Sensitivität gegenüber den Anfangsbedingungen.

Häufig wird dieser Schmetterlingseffekt jedoch missverstanden. Er wird oft derart dargestellt, dass der Flügelschlag eines Schmetterlings, beispielsweise in Hongkong, das Wetter in dramatischer Weise beeinflussen, ja sogar einen Orkan auf der anderen Seite der Erde, in New York, auslösen kann.

Diese Auffassung ist die Quelle des Missverständnisses. Man muss sich dabei nämlich klarmachen, dass der Flügelschlag des Schmetterlings natürlich nicht die Energie für den Orkan bereitstellt und *„er bestimmt auch nicht allein, dass ein Orkan stattfindet, wohl aber hat er wesentlichen Einfluss auf den Ort und den Zeitpunkt des Sturms. „Wesentlich“ heißt hier, dass ohne ihn der Orkan nicht an diesem bestimmten Tag in New York stattgefunden hätte.“*¹⁴¹

8.3.2 Einfache Komplexität

Der entscheidende Punkt an der chaotischen Dynamik ist, dass die Nicht-Vorhersagbarkeit dem betrachteten System selbst inhärent ist. Selbst einfache Systeme, wie unsere Populationsdynamik, sind in diesem Sinne komplex. Die Nicht-Vorhersagbarkeit kommt nicht zustande durch die Überlagerung (zu) vieler Einflussgrößen, also vieler Variablen, die man im Prinzip voneinander trennen könnte, um dann das gegebene Problem analytisch zu lösen, wenn man nur über ausreichend Rechenkapazität verfügen würde. Es handelt sich hier nicht um eine praktische, sondern um eine *prinzipielle Nicht-Vorhersagbarkeit*. Verdeutlichen kann man sich dies auch am bekannten und in Abschnitt 4.2 schon angesprochenen Dreikörperproblem. Betrachtet man ein gravitierendes System aus zwei Körpern, so folgt aus den Newtonschen Axiomen, dass die Bahnen, die diese Körper beschreiben, Ellipsen sind. Dieses Zweikörperproblem ist im Rahmen der klassischen Mechanik ohne weiteres analytisch lösbar.

¹⁴⁰ Bartels, S. 121.

¹⁴¹ an der Heiden, U. (1996): „Chaos und Ordnung, Zufall und Notwendigkeit“. In Küppers (Hrsg.), S. 111.

Aber schon für drei Körper gilt dies im Allgemeinen (mit Ausnahme spezieller Masseverhältnisse) nicht mehr.

Die Wechselwirkung zwischen zwei der drei Körper hängt vom Einfluss ab, den der dritte Körper auf sie ausübt. Andreas Bartels beschreibt dies so:

„Es ist daher nicht möglich, zunächst isoliert die Bewegung des ersten Körpers im Potential des zweiten zu bestimmen, um dann den „Störungsanteil“ des dritten Körpers an der Bewegung des ersten zu addieren. Die Variablen des Systems sind „ineinander verschlungen“; das Gesamtverhalten des Systems wird durch nichtlineare Gleichungen beschrieben.“¹⁴²

Dieses „Ineinander-Verschlungen-Sein“ der Variablen bedeutet, dass das Gesamtverhalten des Systems sich nicht mehr aus der linearen Überlagerung der isolierten Wechselwirkungen ergibt. Die nichtlinearen Gleichungen, die das System beschreiben, sind nur iterativ lösbar. Es gibt keine geschlossene Lösung für alle Zeitpunkte. Man geht deshalb bei der Lösung schrittweise vor und verfolgt die Trajektorie des Systems im Phasenraum von Punkt zu Punkt.

Man kann so die Bahnen näherungsweise berechnen. Es tritt aber eine sog. „Fehlerkatastrophe“ ein. Uwe an der Heiden schreibt dazu:

„[J]eder noch so kleine Fehler in irgendeinem Teil der Rechnung schaukelt sich bei weiteren Rechnungen hoch in einer Weise, dass auch der größte Rechner nach einer gewissen Zeit (die mit der Größe des Rechners zunimmt) überhaupt nicht mehr angeben kann, in welcher Gegend sich irgendeiner der drei Körper befindet“¹⁴³

Der Grund für diese Schwierigkeit liegt eben in der sensitiven Abhängigkeit von den Anfangsbedingungen. Würde man zwei Experimente durchführen, bei denen die drei Körper jeweils aus ganz bestimmten Positionen starten, die in beiden Experimenten sehr ähnlich sind, also z.B. erst an der fünfzigsten Stelle nach dem Komma differieren, dann würden die Bahnen in beiden Experimenten erst einmal annähernd gleich verlaufen. Allerdings würde der Abstand der beiden Bahnen doch mit der Zeit immer mehr zunehmen. Er würde dabei sogar exponentiell anwachsen, sodass die kleinen Unterschiede vom Anfang schließlich so groß werden, dass es den Anschein hätte, beide Experimente hätten nichts miteinander zu tun gehabt. Die beiden Systeme hätten ihre ähnliche Herkunft „vergessen“.

¹⁴² Bartels, S. 124.

¹⁴³ an der Heiden, S. 107.

Es ist also ein typisches Charakteristikum für chaotische Systeme, dass eine (noch so kleine) Abweichung in den Anfangsbedingungen im Laufe der Zeit so groß wie das „Bezugssignal“ selbst wird. Dies ist mit dem Ausdruck „Fehlerkatastrophe“ gemeint: Der „wahre Wert“ und der „Fehler“ werden in einer chaotischen Dynamik ununterscheidbar. Bartels schreibt:

„[Allerdings] kann man die Vorhersagegenauigkeit für einen bestimmten Zeitpunkt t in der Zukunft dadurch beliebig steigern, daß man den Anfangszustand genügend genau bestimmt. Dieses Merkmal unterscheidet das deterministische Chaos wesentlich von indeterministischen Systemen. Aber selbst wenn man von der praktischen Realisierbarkeit einer solch extrem genauen Bestimmung des Anfangszustandes ausgeht, werden jetzt die auf t folgenden Zeitpunkte dieselbe „Angleichung“ von Bezugssignal und Fehler zeigen wie zuvor der Zeitpunkt t . Durch eine Verfeinerung der Werte für die Anfangsbedingungen kann man das Chaos „hinausschieben“, aber nicht beseitigen.“¹⁴⁴

8.4 Chaos und Determinismus

Bringen uns die obigen Überlegungen für unsere Frage nach dem Determinismus neue Erkenntnisse? In gewisser Weise muss man dies sicherlich verneinen und zwar mit der Begründung, dass die chaotischen Systeme eben keine Beispiele für indeterministische Systeme sind. Dies war eine Vermutung, die anfangs nahe lag.

Aber warum genau sind sie keine Beispiele dafür? Wie wir gesehen haben, ist deterministisches Chaos gemeint, wenn in der Physik von Chaos die Rede ist. Das bedeutet, mathematisch ausgedrückt, dass immer der Funktionswert zu einem Zeitpunkt den Funktionswert zum nächsten Zeitpunkt bestimmt. Dies hat zur Folge, dass zwei Modelle einer Theorie, die zum Zeitpunkt t in den Zuständen ihrer Objekte exakt übereinstimmen, für alle späteren Zeitpunkte ebenfalls übereinstimmen. Das entspricht genau Butterfields Determinismusverständnis (und dies geht in diesem Fall natürlich auch mit Earmans Definition konform).

Der entscheidende und interessante Punkt ist allerdings, dass diese Form von Determinismus im Falle chaotischer Systeme mit einer prinzipiellen Unvorhersagbarkeit einhergeht. Dies liegt an der sensitiven Abhängigkeit von den Anfangsbedingungen. Man kann zwar, wie eben gesehen, durch genauere Kenntnis der Anfangsbedingungen die Unvorhersagbarkeit weiter hinausschieben, aber auch diesem Hinausschieben sind Grenzen gesetzt, die von der möglichen

¹⁴⁴ Bartels, S. 130.

Messgenauigkeit herrühren. (Spätestens mit der quantentheoretischen Unschärfe gibt es hier eine prinzipielle Schranke.)

Daraus kann man mehrere Dinge lernen: Man sieht, dass es notwendig ist, Determinismus und Vorhersagbarkeit voneinander zu trennen. Wir hatten diese Thematik bereits in Abschnitt 2.2 diskutiert. Dort hatten wir gesehen, dass Vorhersagbarkeit eine epistemische und Determinismus eine ontologische Kategorie ist. Welchen Unterschied das macht, kann man nun genauer herausarbeiten. Popper hat versucht, Determinismus über Vorhersagbarkeit zu definieren. Er schreibt:

„[Determinism is] the doctrine that the state of any closed physical system at any given future instant of time can be predicted, even from within the system, with any specified degree of precision, by deducing the prediction from theories, in conjunction with initial conditions whose required degree of precision can always be calculated (in accordance with the principle of accountability) if the prediction task is given.”¹⁴⁵

Aber genau dies funktioniert für chaotische Systeme nicht mehr. Dadurch, dass die Abweichungen in den Anfangsbedingungen im Laufe der Zeit exponentiell anwachsen, verhalten sich selbst ähnlichste Anfangszustände irgendwann völlig unterschiedlich. Damit ist keine Vorhersage, auch keine mit einer nur endlichen Präzision, für jeden zukünftigen Zeitpunkt mehr möglich.

Damit ist einsichtig, dass Determinismus keine hinreichende Bedingung für Vorhersagbarkeit sein kann.

Wenn Determinismus keine hinreichende Bedingung für Vorhersagbarkeit ist, ist er dann wenigstens eine notwendige Bedingung? Dies erscheint mir richtig zu sein, allerdings mit gewissen Einschränkungen. Die Einschränkungen betreffen den Vorhersagbarkeitsbegriff. Erstens ist Vorhersagbarkeit immer als Vorhersagbarkeit für uns zu verstehen. Wie mehrfach erwähnt, könnte ein Laplacescher Dämon mit gottähnlichen Fähigkeiten auch das Geschehen in einer indeterministischen Welt vorhersagen.¹⁴⁶ Zweitens meint Vorhersagbarkeit in diesem Zusammenhang mehr als die Angabe bestimmter Wahrscheinlichkeiten. Auch für rein stochastische Prozesse lassen sich Vorhersagen in Form von Wahrscheinlichkeitsaussagen treffen. Vorhersage hier meint aber Vorhersage konkreten Einzelverhaltens, wie etwa: „Der Würfel wird beim nächsten Wurf sechs Augen zeigen“, anstatt „Der Würfel wird mit der Wahrscheinlichkeit $\frac{1}{6}$

¹⁴⁵ Popper, Karl: The Open Universe, zitiert nach: Earman, S. 8.

¹⁴⁶ Vgl. Abschnitt 3.2.

sechs Augen zeigen“ oder „Der Würfel wird im Durchschnitt bei einem von sechs Würfeln sechs Augen zeigen“.

Versteht man Vorhersage in diesem Sinne, dann ist Determinismus tatsächlich eine notwendige Bedingung, um Vorhersagen treffen zu können. Dies ist wiederum ein Hinweis darauf, warum wir Determinismus als eine wichtige Theorietugend erachten. Determinismus ist eine notwendige Bedingung für Vorhersagbarkeit (im oben dargelegten Sinne) und erfolgreiche Vorhersage ist ein Ziel von Wissenschaft. Damit ist Determinismus in gewisser Weise eine Bedingung für erfolgreiche Wissenschaft und zwar in einem Sinn, den man aus Poppers Versuch Determinismus zu definieren herauslesen kann: Wissenschaft soll es ermöglichen mit einem spezifischen Grad an Präzision bestimmte Ereignisse vorauszusagen. Dies heißt allerdings nicht, dass Determinismus eine notwendige Bedingung für erfolgreiche Wissenschaft ist. So stellt die Quantentheorie eine äußerst erfolgreiche wissenschaftliche Theorie dar, die aber gemäß bestimmter Interpretationen indeterministisch ist.¹⁴⁷ Auch statistische Vorhersagen sind Vorhersagen, die erfolgreiche Wissenschaft ermöglichen können.

Ein weiterer interessanter Aspekt dieses Problemfelds lässt sich anhand eines Zitats von James Clerk Maxwell verdeutlichen:

„Es ist eine metaphysische Doktrin, dass gleiche Ursachen gleiche Wirkungen nach sich zögen. Niemand kann sie bestreiten. Ihr Nutzen aber ist gering in einer Welt wie dieser, in der gleiche Ursachen niemals wieder eintreten und nichts zum zweiten Mal geschieht. Das daran anlehrende physikalische Axiom lautet: Ähnliche Ursachen haben ähnliche Wirkungen. Dabei sind wir aber übergegangen zu Ähnlichkeit, von absoluter Genauigkeit zu mehr oder weniger grober Annäherung.“¹⁴⁸

Die „unbestreitbare metaphysische Doktrin“, von der Maxwell spricht, bezeichnet man auch als *starkes Kausalitätsprinzip*. In der Terminologie von Ursache und Wirkung besagt es, dass gleiche Ursachen gleiche Wirkungen zeitigen. Daran angelehnt ist das „physikalische Axiom“, das sog. *schwache Kausalitätsprinzip*, welches beinhaltet, dass ähnliche Ursachen ähnliche Wirkungen nach sich ziehen. Wir haben uns in Abschnitt 3.1 darauf geeinigt, dass wir die möglicherweise problematische Terminologie von Ursache und Wirkung

¹⁴⁷ Natürlich gibt es in der Interpretationsdebatte um die Quantentheorie einen Streit, ob die Quantentheorie eine deterministische oder eine indeterministische Theorie ist. Auch wenn dieser Streit keineswegs entschieden ist, so zeigt er doch, dass man nicht bewusst unterstellen muss, dass eine Theorie deterministisch ist, damit sie erfolgreich sein kann. Vgl. hierzu auch Kapitel 9.

¹⁴⁸ Maxwell, James Clerk; zitiert nach: Küppers, S. 169f.

möglichst vermeiden wollten. Ich denke allerdings, dass das, was Maxwell hier inhaltlich aussagt, sich leicht in Earman's Redeweise von Welten oder Butterfields Redeweise von Modellen übersetzen lässt. Das, was man klassischerweise als starkes Kausalitätsprinzip bezeichnet hat, würde dann in Earman's bzw. Butterfields Terminologie dem Folgenden entsprechen: Übereinstimmung von physikalisch möglichen Welten zu einem Zeitpunkt bzw. von Modellen zu einem Zeitpunkt impliziert Übereinstimmung zu allen anderen Zeitpunkten.

Das schwache Kausalitätsprinzip müsste man dann in etwa folgendermaßen übersetzen: Ähnlichkeit von physikalisch möglichen Welten zu einem Zeitpunkt bzw. von Modellen zu einem Zeitpunkt impliziert Ähnlichkeit zu allen anderen Zeitpunkten.

Genau diese Aussage ist es wiederum, die von der Chaostheorie als nicht allgemeingültig erwiesen wird. Dies hat aber keine Konsequenzen für die ursprünglichen Determinismusdefinitionen von Earman bzw. Butterfield. Es gibt keinen Hinweis darauf, warum chaotische Systeme im Hinblick auf diese Definitionen indeterministisch sein sollten.

Formuliert man dies wiederum in der Sprache der Mathematik, also hinsichtlich der Anfangswertprobleme, dann kann man das Folgende sagen:

Das Problem bei chaotischen Systemen ist nicht die Eindeutigkeit der Lösung für ein gegebenes Anfangswertproblem, sondern die Stabilität der Lösung für verschiedene Anfangswertprobleme, bei denen die Anfangsbedingungen beliebig dicht beieinander liegen. Konvergenz der Anfangsbedingungen zieht im Fall chaotischer Systeme keine Konvergenz der Lösungen für spätere Zeitpunkte nach sich.¹⁴⁹

Abschließend lässt sich also festhalten, dass chaotische Systeme nicht dazu geeignet sind, den Determinismus in Earman's und Butterfields Sinne als falsch zu erweisen. Anders sähe es wohl aus, wenn man Determinismus abweichend, also z.B. in Poppers Sinn verstehen wollte. Dieser Frage gehe ich allerdings nicht weiter nach, da ich mich in dieser Arbeit primär an Butterfields und Earman's Definitionsversuchen orientiere und diese beiden Ansätze auch für die brauchbarsten und plausibelsten halte.

¹⁴⁹ Vgl. Earman, S. 155.

9. Exkurs in die nicht-klassische Physik

Zwar ist das Thema dieser Arbeit der Determinismus bei klassischen physikalischen Theorien; dennoch werde ich an dieser Stelle einen Blick über den Tellerrand wagen und kurz darauf eingehen, wie es um den Determinismus in modernen, nicht-klassischen Theorien bestellt ist. Dies ist, meiner Meinung nach, für eine gehaltvolle Diskussion der Thematik unerlässlich, insbesondere, weil es für die beiden grundsätzlichen Verständnisweisen des Determinismuskonzepts (Determinismus als These über unsere Welt oder als Eigenschaft von Theorien) spannende Schlüsse zulässt.

Wenn man Determinismus als Eigenschaft von Theorien begreift, ist unverkennbar, dass die Frage berechtigt ist, ob moderne, nicht-klassische Theorien deterministisch sind oder nicht. Versteht man Determinismus als Eigenschaft unserer Welt, so haben wir schon mehrfach das die folgende Überlegung diskutiert: Wenn man überhaupt mit Hilfe unserer physikalischen Theorien etwas über die Gültigkeit des Determinismus in der Welt aussagen wollte, dann müsste man schon unsere besten Theorien betrachten und nicht Theorien wie die klassische Mechanik, die sich streng genommen schon als falsch erwiesen haben. Natürlich bliebe dann immer noch die Frage, welche Aussagekraft solche Erkenntnisse wirklich hätten. Beispielsweise würden Verfechter einer pessimistischen Metainduktion¹⁵⁰ bestreiten, dass es überhaupt irgendeine Relevanz solcher Erkenntnisse für die Ontologie unserer Welt gibt.¹⁵¹

Nach diesen zusammenfassenden Bemerkungen möchte ich jetzt auf den Status des Determinismus in der modernen Physik zu sprechen kommen. Dabei kann ich natürlich die verschiedenen Argumente nicht so gründlich diskutieren, wie das für die klassische Physik der Fall war. Deshalb werde ich in diesem Kapitel weitestgehend versuchen, die Ergebnisse der Diskussion zu referieren und zusammenzufassen.

Im Vorangegangenen habe ich von „moderner Physik“ oder „nicht-klassischer Physik“ gesprochen. Was genau ist damit gemeint? Es gibt zwei zentrale Säulen, auf denen die moderne physikalische Forschung fußt. Die eine Säule ist die Relativitätstheorie und die andere die Quantentheorie. Dies sind die beiden

¹⁵⁰ Laudan, L. (1981): „A Confutation of Convergent Realism“. In: Papineau, D. (Hrsg.) (1996): *The Philosophy of Science*, Oxford, New York: Oxford University Press, S. 107-138.

¹⁵¹ Dieser Punkt wird in Kapitel 10 noch ausführlicher diskutiert werden.

Fundamentaltheorien der heutigen Zeit. Allerdings stehen zum aktuellen Zeitpunkt beide Theorien mehr oder weniger unverbunden nebeneinander. Eine der größten Herausforderungen der aktuellen Forschung besteht darin, beide Theorien miteinander zu verbinden.

In den folgenden Abschnitten werde ich zunächst kurz darstellen, wie es um den Determinismus in der Relativitätstheorie bestellt ist und danach welchen Status er in der Quantentheorie hat.

9.1 Relativitätstheorie

9.1.1 Spezielle Relativitätstheorie

Beginnen wir mit der speziellen Relativitätstheorie. Es ist evident, dass diese Theorie für unsere Thematik interessant ist. Wir haben gesehen, dass die zentralen Argumente gegen den Determinismus in der klassischen Physik darauf beruhen, dass es keine obere Grenze für Teilchen- bzw. Signalgeschwindigkeiten gibt. In der speziellen Relativitätstheorie hingegen gibt es diese obere Schranke. Man kann kein Teilchen auf Überlichtgeschwindigkeit beschleunigen und kein kausales Signal kann sich mit einer Geschwindigkeit fortbewegen, die größer als die Lichtgeschwindigkeit c ist. Damit werden unerfreuliche Entitäten, wie die Space Invaders ausgeschlossen. Das bedeutet, dass die zentralen Argumente gegen den Determinismus in der klassischen Physik sich nicht auf die spezielle Relativitätstheorie übertragen lassen. Allerdings ist der Preis für diese obere Geschwindigkeitsschranke der Verlust des Begriffs der absoluten Gleichzeitigkeit. Gleichzeitigkeit zweier Ereignisse gibt es in der Relativitätstheorie nur noch relativ zu einem Bezugssystem.

Carl Hoefer verweist auf einen weiteren Punkt, der die spezielle Relativitätstheorie zu einer „determinismusfreundlichen“ Umgebung macht: die statische, sich nicht verändernde Struktur der Raumzeit (sog. Minkowski-Raumzeit).¹⁵² Dieser Unterschied zur allgemeinen Relativitätstheorie macht die Raumzeit stabil und sorgt dafür, dass sie frei von Singularitäten ist.

Man könnte deshalb meinen, dass man, wenn schon nicht in den klassischen Theorien, dann doch aber in der speziellen Relativitätstheorie eine klarerweise deterministische Theorie gefunden hat. Dies ist aber nicht richtig. Hoefer schreibt dazu:

¹⁵² Vgl. Hoefer.

„For source-free electromagnetic fields in special-relativistic space-time, a nice form of Laplacean determinism is provable. Unfortunately, interesting physics needs more than source-free electromagnetic fields. Earman (1986) ch. IV surveys in depth the pitfalls for determinism that arise once things are allowed to get more interesting (e.g. by the addition of particles interacting gravitationally).“¹⁵³

Daraus folgt, dass es immer noch gewisse Schwierigkeiten gibt, auch wenn in der speziellen Relativitätstheorie gewisse Probleme nicht auftauchen. Der Status des Determinismus kann auch in der speziellen Relativitätstheorie nicht so einfach geklärt werden. Earman diskutiert diese Schwierigkeiten in seinem Buch und kommt dabei zu folgenden Ergebnissen:¹⁵⁴:

1. Die quellenfreie relativistische Feldtheorie ist Laplace-deterministisch.
2. Für Partikeltheorien, die beispielsweise Gravitationswechselwirkungen zwischen den Teilchen beachten, bleiben einige Fragen offen. Auch Earman kann nicht abschließend klären, was das für den Determinismus bedeutet.
3. Auch in der speziellen Relativitätstheorie kann es Probleme mit Tachyonen geben. (Zwar kann man Teilchen nicht von Unterlichtgeschwindigkeit auf Überlichtgeschwindigkeit beschleunigen, aber es kann evtl. Teilchen geben, die sich schon immer mit Überlichtgeschwindigkeit bewegt haben.) Allerdings hat man es auch hier mit einem subtilen Problem zu tun und es ist nicht klar, ob sich daraus ein schlagkräftiges Argument gegen den Determinismus der speziellen Relativitätstheorie konstruieren lässt.

Resümierend kann man also festhalten, dass die spezielle Relativitätstheorie (auch für Earman) das beste Beispiel für eine deterministische Theorie darstellt oder anders gesagt, dass die speziell-relativistischen Welten am ehesten deterministische Welten sind. Dies hat zwei Gründe: Zum einen verhindert, wie schon erwähnt, die obere Grenze für Geschwindigkeiten problematische Einflüsse aus der Unendlichkeit. Das ist der Vorteil gegenüber der klassischen Physik. Zum anderen besteht ein Vorteil gegenüber der allgemeinen Relativitätstheorie, nämlich dass die statische Struktur der Raumzeit frei von Singularitäten ist.¹⁵⁵ Die Struktur der Minkowski-Raumzeit schützt demzufolge auch vor

¹⁵³ Hofer.

¹⁵⁴ Vgl. Earman, S. 61-78.

¹⁵⁵ Diesen Vorteil hat natürlich auch die Newtonsche Raumzeit gegenüber der Raumzeit der allgemeinen Relativitätstheorie.

unliebsamen Überraschungen, die uns jetzt in der Diskussion der Allgemeinen Relativitätstheorie begegnen werden.

9.1.2 Allgemeine Relativitätstheorie

Die allgemeine Relativitätstheorie ist bei weitem keine so „determinismusfreundliche“ Umgebung, wie es die spezielle Relativitätstheorie ist.

Dies hängt vor allem damit zusammen, dass dort die Raumzeit im Allgemeinen keine gleichförmige Struktur mehr aufweist, sondern selbst veränderlich ist.

Earman fasst das entstehende Problem in die folgenden Worte:

„In general relativistic worlds, however, the space-time does not remain similar and unmovable; it is rather an active participant in the unfolding drama of the world, and as a result its structure varies from physically possible world to physically possible world, and perhaps, from one instant to another within the same world. Since space-time is no longer a fixed canvas on which the world history is to be painted, the laws of nature, if they are deterministic, must specify how the structure of space-time itself evolves – the canvas and the painting are constructed simultaneously, a neat conjuring trick if it can be brought off.“¹⁵⁶

Earman diskutiert nun ausführlich das Verhältnis von allgemeiner Relativitätstheorie und Determinismus.¹⁵⁷ Diese Diskussion soll hier wiederum nicht im Detail nachvollzogen werden. Ich werde im Folgenden nur einige zentrale Fragestellungen und Probleme darlegen, um aufzuzeigen, wie es um den Determinismus in der allgemeinen Relativitätstheorie bestellt ist.

Mit den Feldgleichungen der allgemeinen Relativitätstheorie sind verschiedenste Modelle der Raumzeit vereinbar. Carl Hofer weist in diesem Zusammenhang darauf hin, dass viele dieser Modelle und insbesondere einige der interessantesten Modelle nicht deterministisch sind.¹⁵⁸ So fand Kurt Gödel 1949 eine Lösung der Einsteinschen Feldgleichung, die nicht deterministisch ist.¹⁵⁹ Earman diskutiert noch weitere Raumzeitmodelle. Dabei erlegt er den verschiedenen Modellen nach und nach immer weitere Einschränkungen auf. Die Idee dabei ist, dass sich mit Hilfe dieser Einschränkungen vielleicht der Determinismus dieser Modelle gewährleisten lässt. Gelingt es darüber hinaus diese Einschränkungen sinnvoll (physikalisch) zu begründen, so könnte man den Determinismus retten. Allerdings stellt sich bei Earmans Untersuchung

¹⁵⁶ Earman, S. 170.

¹⁵⁷ Vgl. ebd. S. 170-197.

¹⁵⁸ Vgl. Hofer.

¹⁵⁹ Vgl. Earman, S. 172f.

heraus, dass auch für Modelle mit diesen Einschränkungen der Determinismus zumeist nicht gezeigt werden kann und selbst wenn man ihn für andere Modelle mit anderen Einschränkungen zeigen kann, bliebe immer noch zu erörtern, wie man die speziellen Einschränkungen rechtfertigen kann.¹⁶⁰

Mit dieser simplen und wenig erhellenden Feststellung soll es aber nicht getan sein. Wir wollen hier noch den ein oder anderen interessanten Gesichtspunkt kurz anreißen.¹⁶¹

Ein Problem für den Determinismus in der allgemeinen Relativitätstheorie verursacht das sog. Hole-Argument. Es besagt in etwa folgendes:¹⁶²

Modelle der allgemeinen Relativitätstheorie werden darüber spezifiziert, dass ein Tripel $\langle M, g, T \rangle$ von mathematischen Objekten angegeben wird.

M steht dabei für eine kontinuierliche Mannigfaltigkeit, d.h. für eine völlig unstrukturierte Raumzeit. Für diese Raumzeit wird eine zusätzliche Struktur benötigt, die verschiedene Dinge leisten muss: So soll man die Zeitrichtung von den Raumrichtungen unterscheiden können, eine bestimmte Geometrie soll der Raumzeit zugrunde liegen etc. All diese zusätzliche Struktur steckt in g . T wiederum steht für den Materie- und Energieinhalt, der innerhalb dieser Raumzeit verteilt ist.

Es ist nun mit den Gesetzen der allgemeinen Relativitätstheorie vereinbar, dass man eine bestimmte mathematische Operation auf ein bestimmtes Modell der allgemeinen Relativitätstheorie anwendet (einen sog. „Hole Diffeomorphismus“). Diese Operation kann so gewählt werden, dass sie zu einem bestimmten Zeitpunkt t_0 den gesamten Materie- und Energieinhalt T und die Metrik g in einem bestimmten Bereich der Raumzeit (dem sog. „hole“) verschiebt, aber das Tripel $\langle M, g, T \rangle$ vor dem Zeitpunkt t_0 unverändert lässt. Man erhält so ein neues Modell der Raumzeit $\langle M, g^*, T^* \rangle$, welches ebenfalls ein konsistentes Modell der Theorie ist. Das bedeutet, dass, selbst wenn die Vergangenheit ($t < t_0$) feststeht, die Gleichungen der allgemeinen Relativitätstheorie nicht festlegen, wie es zum Zeitpunkt t_0 und danach innerhalb des „Holes“ aussehen wird.

Allerdings muss man anmerken, dass das Hole-Argument insofern problematisch sein kann, als die Modelle $\langle M, g, T \rangle$ und $\langle M, g^*, T^* \rangle$ empirisch nicht unterscheidbar sind. Das Hole-Argument trifft daher nur Verfechter einer be-

¹⁶⁰ Vgl. Earman., S. 173-185.

¹⁶¹ Das Folgende orientiert sich an Hoefers Darstellung. Vgl. Hoefers.

¹⁶² Vgl. Hoefers.

stimmten Auffassung der Raumzeit, sog. Substantialisten.¹⁶³ Ist man Auffassung einer anderen Raumzeit-Interpretation macht das Hole-Argument vielleicht gar kein Problem.

Daran sieht man, dass in die Frage nach dem Status eines solchen Arguments immer auch bestimmte philosophische Grundhaltungen eingehen. Verfechter unterschiedlicher Interpretationen der allgemeinen Relativitätstheorie kommen hier zu verschiedenen Ergebnissen.

Das Hole-Argument ist nicht das einzige Problem für den Determinismus in der allgemeinen Relativitätstheorie. Insbesondere die Möglichkeit von Singularitäten in der Raumzeit macht hier noch weitere große Probleme. Carl Hofer schreibt: „*Different types of singularities bring different types of threat to determinism.*“¹⁶⁴

Betrachtet man z.B. gewöhnliche schwarze Löcher (Schwarzschildsche schwarze Löcher), dann stellt man fest, dass es außerhalb des Ereignishorizonts einer solchen Singularität keine Probleme für den Determinismus gibt. Innerhalb des Ereignishorizonts kann es allerdings Schwierigkeiten geben. Manche Modelle für solche schwarzen Löcher enthalten sog. Cauchy-Horizonte innerhalb des Ereignishorizonts. Hinter dem Cauchy-Horizont bricht der Determinismus zusammen.

Man kann auch auf eine andere, fast triviale Weise eine Singularität konstruieren, die mit den Einsteinschen Feldgleichungen verträglich ist. Man betrachte ein bestimmtes Raumzeitmodell und darin eine raumartige Fläche zum Zeitpunkt t_e , also gewissermaßen den Zustand der Welt zum Zeitpunkt t_e . Dann schneidet man diese Fläche und alle zeitlich dahinter liegenden Punkte ab und „wirft sie weg“. Dadurch erhält man ein konsistentes Modell der allgemeinen Relativitätstheorie, in dem zum Zeitpunkt t_e das Universum völlig grundlos aufhört zu existieren. Da aber dieses Modell sich vor dem Zeitpunkt t_e in keiner Weise von einem Modell unterscheidet, in dem das Universum nicht aufhört zu existieren, kann die allgemeine Relativitätstheorie nicht deterministisch sein. Allerdings kann man die Frage nach dem Sinn eines solchen Modells stellen. Es erscheint nämlich durchaus opportun zu fordern, dass die Raumzeit nicht einfach ohne physikalischen Grund endet.

¹⁶³ Vgl. Norton, J. (2004): „The Hole Argument“. In: *Stanford Encyclopedia of Philosophy*, <http://plato.stanford.edu/entries/spacetime-holearg/>, Stand: 22.02.2006.

¹⁶⁴ Hofer.

Die vielleicht problematischsten Singularitäten sind sog. „nackte Singularitäten“. Die Probleme bei gewöhnlichen Singularitäten betreffen nur das Innere des Ereignishorizonts; außerhalb gibt es keine Probleme mit dem Determinismus. Bei „nackten Singularitäten“ gibt es jedoch keinen Schutz durch einen solchen Ereignishorizont. Damit besteht die Gefahr, dass nicht nur alles Mögliche in einer solchen Singularität verschwinden kann, sondern dass auch alles Mögliche plötzlich aus ihr auftauchen kann. Damit wäre wiederum der Determinismus hinfällig. Allerdings gibt es auch hier zumindest die Hoffnung, solche unerfreulichen Effekte mittels sog. „Cosmic-Censorship-Hypothesen“ ausschalten zu können. Indes konnte bis heute keine generelle und überzeugende Form einer solchen Hypothese bewiesen werden.

Abschließend kann man wiederum nur festhalten, dass der Determinismus in der allgemeinen Relativitätstheorie höchst fragwürdig ist. Zwar gibt es sowohl deterministische als auch indeterministische Modelle der allgemeinen Relativitätstheorie und die Theorie ist damit in Butterfields Sinne natürlich eine indeterministische. Aber es stellt sich eben darüber hinaus die Frage, welche Konsequenzen das hat. Um diese Frage zu beantworten, müsste man mehr darüber sagen, was ein *vernünftiges* Raumzeitmodell der allgemeinen Relativitätstheorie ist. Entsprechend endet Earman's Kapitel über die allgemeine Relativitätstheorie auch mit den nachstehenden Worten:

„Additional observational and theoretical results could help to resolve some of the remaining uncertainty; but the ultimate fate of large scale determinism turns on some sticky interpretation problems about what counts as a reasonable space-time model, and these problems resist narrowly scientific solutions. If this is true for the general theory of relativity, then it is doubly true for quantum theory, as we will now see.“¹⁶⁵

Auch wir werden nun einen Blick auf die Quantentheorie werfen.

9.2 Quantentheorie

Als wir uns im Vorangegangenen mit der klassischen Physik auseinandergesetzt haben, habe ich darauf hingewiesen, dass es eine weit verbreitete Überzeugung ist, dass die klassische Physik geradezu den Prototyp einer deterministischen Theorie darstellt. Wir haben dann aber gesehen, dass diese Überzeu-

¹⁶⁵ Earman, S. 197.

gung auf tönernen Füßen steht. Es ist bei weitem keine ausgemachte Sache, ob und wie die klassische Physik deterministisch ist.

Bei der Quantentheorie ist der Fall in gewisser Weise ähnlich gelagert. Auch hier gibt es eine weit verbreitete Auffassung bezüglich des Determinismus. Nur besagt diese, dass die Quantentheorie ein Paradebeispiel für eine indeterministische Theorie ist. Der Grund hierfür ist, dass sich im Rahmen der Quantenphysik nur noch Wahrscheinlichkeiten für bestimmte Messergebnisse angeben lassen. Man kann aber für einzelne Messungen keine konkreten Messergebnisse mehr vorhersagen.

Wie wir aber nun sehen werden, ist dieses indeterministische Verständnis der Quantentheorie nur eine von mehreren Möglichkeiten, die Erkenntnisse der Quantenphysik zu interpretieren. Es stehen nämlich mehrere Interpretationsvorschläge für die Quantentheorie zur Debatte. Manche dieser Interpretationsansätze sind in der Tat indeterministisch, andere sind deterministisch. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt scheint es so, als ließe sich empirisch nicht zwischen den verschiedenen Interpretationen entscheiden. Alle haben verschiedene Stärken und Schwächen und welchen Ansatz man letztlich bevorzugt, hängt davon ab, wie man diese Stärken und Schwächen gewichtet.

Alle Interpretationsversuche kann man als unterschiedliche Lösungsversuche für das sog. quantenmechanische Messproblem verstehen, denn jeder Ansatz geht mit diesem Problem auf verschiedene Weise um. Insofern kann man auch festhalten, dass das Messproblem das zentrale Problem bei der Suche nach einer adäquaten Interpretation der Quantentheorie ist.

Dementsprechend ist die erste Frage, die man sich stellen muss, natürlich die Frage, was genau unter dem Messproblem zu verstehen ist.¹⁶⁶

Um diese Frage zu beantworten, betrachten wir eine bestimmte Spinnmessung an einem physikalischen Teilchen, beispielsweise an einem Elektron.

Für die Messung benutzen wir ein Messgerät mit drei möglichen Zeigerstellungen:

Stellung m_0 : Stellung vor der Messung

Stellung m_1 : Spin „up“

Stellung m_2 : Spin „down“

¹⁶⁶ Die folgende Darstellung orientiert sich an: Albert, D. Z. (1992): *Quantum Mechanics and Experience*, Cambridge/ London: Harvard University Press, S. 73 - 79.

Wenn wir nun mit einem solchen Messgerät eine Spinnmessung in z-Richtung vornehmen geschieht Folgendes: Je nachdem ob wir ein Teilchen mit Spin „up“ oder eins mit Spin „down“ durch das Messgerät hindurchschicken, geht das Messgerät von Zustand m_0 in den Zustand m_1 oder m_2 über. Formal kann man dies folgendermaßen beschreiben:

$$|z \uparrow\rangle|m_0\rangle \rightarrow |z \uparrow\rangle|m_1\rangle \vee |z \downarrow\rangle|m_0\rangle \rightarrow |z \downarrow\rangle|m_2\rangle \quad [23]$$

(Man beachte, dass der Pfeil (\rightarrow) hier und in Folgenden den zeitlichen Übergang von „vor der Messung“ zu „nach der Messung“ symbolisiert.)

In dieses Messgerät, das Spinkomponenten in z-Richtung misst, schicken wir nun ein Teilchen, dessen Spinkomponente in x-Richtung wir kennen.¹⁶⁷ (In diesem Fall nehmen wir an, dass das Teilchen in x-Richtung einen Spin „up“ hat.) Gemäß des quantenmechanischen Formalismus muss diese Situation folgendermaßen beschrieben werden:

$$\begin{aligned} |x \uparrow\rangle|m_0\rangle &= \left(\frac{1}{\sqrt{2}}|z \uparrow\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|z \downarrow\rangle \right) |m_0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}|z \uparrow\rangle|m_0\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|z \downarrow\rangle|m_0\rangle \\ &\rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}}|z \uparrow\rangle|m_1\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|z \downarrow\rangle|m_2\rangle \end{aligned} \quad [24]$$

Dies ist die korrekte quantenmechanische Beschreibung des Systems nach der Messung. Man sieht, dass das System sich in einem Superpositionszustand, einer Überlagerung der Zustände „up“ und „down“, befindet.

Das Problem entsteht jetzt dadurch, dass wir faktisch, d.h. wenn wir tatsächlich messen, keine solchen Superpositionen beobachten. Wir sehen keine wie auch immer gearteten „verschmierten“ Mischzustände aus verschiedenen Zeigerstellungen.¹⁶⁸ Was wir messen ist das Folgende:

$$|x \uparrow\rangle|m_0\rangle \rightarrow |z \uparrow\rangle|m_1\rangle \vee |z \downarrow\rangle|m_2\rangle \quad [25]$$

Wir messen bei einer Einzelmessung entweder Spin „up“ oder Spin „down“ und eben keine superponierten Zustände.

Gleichung [24] und [25] unterscheiden sich ganz offensichtlich und sie sind auch empirisch unterscheidbar. Die Empirie sagt uns darüber hinaus, dass [25] unser Messergebnis ist und nicht [24]. Problematisch wird es dadurch, dass es gute Gründe dafür gibt, anzunehmen, dass der quantenmechanische Formalis-

¹⁶⁷ Spinnmessungen in x- und z-Richtung verhalten sich zueinander wie Orts- und Impulsmessungen. Man kann niemals beide Größen zur gleichen Zeit exakt messen.

¹⁶⁸ Schrödingers berühmtes Katzenbeispiel hebt ebenfalls auf diese Differenz ab.

mus, also [24], eine adäquate Beschreibung der Situation ist, so lange wir keine Messungen vornehmen. In der Differenz zwischen [24] und [25] liegt folglich das Messproblem begründet. Doch worin besteht es genau? Welche einzelnen Aspekte des Messproblems kann man identifizieren?

Meiner Meinung nach kann man folgende Aspekte des Messproblems ausmachen und voneinander unterscheiden:

a) Was ist eine Messung (in der Quantenphysik) und was ist das besondere an einer solchen Messung?

b) Wie kommt man in der Messung von [24] nach [25]? Warum und in welcher Form „gibt“ es überhaupt den Zustand [25]?

c) Warum beobachten wir keine Superpositionszustände? (Gibt es z.B. einen Kollaps der Wellenfunktion?)

d) Warum stellt sich in einer Messung gerade dieser spezielle Wert ein und nicht ein anderer? (Warum messe ich jetzt gerade „up“ und nicht „down“?)

Hierbei sind b),c) und d) speziellere Ausdifferenzierungen der übergeordneten Frage a). Verknüpft mit diesen Fragen ist noch eine weitere Frage, nämlich:

e) Was bedeutet es für ein System (anschaulich), wenn es sich in einem Superpositionszustand befindet?

Auf alle Fragen a)-e) sind unterschiedliche Antworten möglich und entsprechend geben die verschiedenen Interpretationsansätze unterschiedliche Antworten. Die moderne physikalische Forschung in Gestalt der sog. Dekohärenztheorie kann zwar bestimmte Aspekte des Messproblems erhellen.¹⁶⁹ So kann sie die Frage c) beantworten und auch in bestimmter, pragmatischer Weise die Frage b). Bestimmte Aspekte des Messproblems bleiben aber auch mittels der Dekohärenztheorie unbeleuchtet (zumindest zum aktuellen Zeitpunkt). Insbesondere Frage d) wird durch die Dekohärenztheorie nicht beantwortet. Frage d) ist aber gerade die Frage, deren Beantwortung für die Frage nach dem Determinismus in der Quantentheorie relevant ist, denn hier erfolgt der Übergang von der Wahrscheinlichkeitsangabe für ein Messergebnis zum faktischen

¹⁶⁹ Zu den Leistungen (und auch Grenzen) der Dekohärenztheorie beachte man beispielsweise die folgenden Artikel: Bacciagaluppi, G. (2004): „The Role of Decoherence in Quantum Theory”. In: *Stanford Encyclopedia of Philosophy*, <http://www.science.uva.nl/~seop/entries/qm-decoherence/>, Stand:12.04.2005; Joos, E.: *Elements of Environmental Decoherence*, <http://www.decoherence.de/9908008.pdf>, Stand 01.07.2005; Kiefer, C. und Joos, E.: *Decoherence: Concepts and Examples*, <http://www.decoherence.de/9803052.pdf>, Stand 01.07.2005.

Messergebnis. Genau dieser Übergang muss näher beleuchtet werden. Findet dort ein indeterministischer, rein stochastischer Prozess statt oder läuft doch ein deterministischer Prozess ab? Auf diese Frage geben die verschiedenen Interpretationsansätze unterschiedliche Antworten. Wir wollen kurz darauf eingehen, wie die Antwort auf die Frage nach dem Determinismus ausfällt, je nachdem, welche Interpretation man bevorzugt.

Die einschlägigste Interpretation der Quantentheorie ist die sog. „Kopenhagener Deutung“, die unmittelbar mit den Namen Bohr und Heisenberg verknüpft ist. Die zentrale Idee der Kopenhagener Interpretation besteht darin, dass definite Werte bestimmter Größen einem Quantenobjekt immer nur im Hinblick auf bestimmte Messapparaturen zukommen.¹⁷⁰ Nach Bohrs Verständnis gibt es eine Sphäre der klassischen Observablen, die wir voraussetzen müssen. Wir sprechen vom Ort oder Impuls eines Quantenobjekts, obwohl dies streng genommen eine klassische Redeweise darstellt, die den Quantenobjekten unangemessen ist. Dies zeigt sich an der Unschärferelation, die z.B. besagt, dass man einem Quantenobjekt nicht zur gleichen Zeit einen definiten Wert für Ort und Impuls zusprechen kann. Damit sind Ort und Impuls auch keine Eigenschaften, die dem Quantenobjekt per se zukommen. Ort und Impuls sind in Bohrs Terminologie sog. komplementäre Größen. Das bedeutet auch, dass es nicht angemessen ist, den Quantenobjekten Messgrößen wie Ort und Impuls zuzuschreiben. Sie kommen den Quantenobjekten gar nicht zu, sondern sind relationale Größen, Wahrscheinlichkeiten für bestimmte Messergebnisse hinsichtlich eines bestimmten Messgeräts. Erst im Messprozess werden diese Eigenschaften quasi erzeugt. Vor einer Messung wird die zeitliche Entwicklung eines Quantensystems mittels der Schrödingergleichung beschrieben. Die Schrödingergleichung ist eine vollkommen deterministische Gleichung. Sobald allerdings eine Messung durchgeführt wird, findet der Übergang zu einer zweiten, indeterministischen Dynamik statt, die nicht mehr mittels der Schrödingergleichung beschrieben werden kann.

Da die Eigenschaften der Quantenobjekte hier rein relational, als Wahrscheinlichkeiten verstanden werden, ist einsichtig, dass die Kopenhagener Deutung nicht deterministisch ist. Im Messprozess finden indeterministische Prozesse

¹⁷⁰ Vgl. hierzu: Bartels, S. 88-92.

statt. Es gibt eben auf der Quantenebene unhintergehbare Wahrscheinlichkeiten, die nichts mit unserer subjektiven Unkenntnis zu tun haben.¹⁷¹

Genau wie die anderen Interpretationsansätze ist auch die Kopenhagener Interpretation nicht unumstritten und mit zahlreichen Problemen und offenen Fragen belastet. An dieser Stelle kann aber keine tiefgehendere Auseinandersetzung mit den Vorzügen und Problemen der einzelnen Ansätze erfolgen. Lediglich die Grundideen sollen kurz skizziert werden. Allerdings möchte ich darauf hinweisen, dass z.B. Einsteins Einwände gegen die Kopenhagener Interpretation, die letztlich zum berühmten EPR-Aufsatz führten, nicht zuletzt darin begründet waren, dass es in der Welt, seiner Auffassung nach, keinen fundamentalen Indeterminismus geben könne. Einstein war sich sicher, dass Gott nicht würfelt. Seine Überzeugung, dass es in der Welt deterministisch zugehen müsse, war für ihn ein Grund, die Kopenhagener Interpretation abzulehnen und die Quantenmechanik für eine unvollständige Theorie zu halten.

Auch andere Interpretationsansätze legen ein indeterministisches Verständnis der Quantentheorie nahe, wie z.B. die Kollapstheorie von Ghirardi, Rimini und Weber.¹⁷² Die Grundidee dieser Kollapstheorie ist, dass die Schrödingergleichung modifiziert wird, um das Messproblem zu lösen.¹⁷³ Es wird ein Zusatzterm eingeführt, der eine geringe Wahrscheinlichkeit für den „Kollaps“ der Wellenfunktion eines Teilchens repräsentiert. Im Falle des Kollapses brechen die Superpositionen zusammen und das Teilchen wird lokalisiert. Dieser Kollaps wiederum ist kein deterministischer Prozess. Auch hier werden durch die Modifikation der Schrödingergleichung irreduzible Wahrscheinlichkeiten und somit ein Indeterminismus eingeführt.

Aber es gibt auch noch andere, deterministische Interpretationen der Quantentheorie, sog. Hidden-Variable-Theorien. Insbesondere die Bohmsche Formulierung der Quantenmechanik ist hier zu nennen.¹⁷⁴ Es lässt sich zeigen, dass sie (zumindest in bestimmten Bereichen) empirisch äquivalent zum orthodoxen quantenmechanischen Formalismus ist. Dennoch ist die Bohmsche Mechanik vollkommen deterministisch. Alle Teilchen haben zu allen Zeiten feste Positio-

¹⁷¹ Vgl. hierzu: Bartels, S. 88f.

¹⁷² Auch die Kopenhagener Interpretation ist eine sog. Kollapstheorie.

¹⁷³ Einen Überblick über die zentralen Ideen dieses Ansatzes liefert: Ghirardi, G. (2002): „Collapse Theories“. In: *Stanford Encyclopedia of Philosophy*, <http://www.science.uva.nl/~seop/entries/qm-collapse/>, Stand: 12.04.2005.

¹⁷⁴ Vgl. hierzu: Albert, S. 134-179.

nen und Geschwindigkeiten. Die Grundidee fasst Jeremy Butterfield so zusammen:

„The basic idea is that a quantum system consists of both a wave and a particle. The wave evolves deterministically over time according to the fundamental equation of quantum theory (the Schrödinger equation) and it determines the particle's motion, which therefore also moves deterministically, given the wave (hence this interpretation is also called the pilot wave interpretation).¹⁷⁵“

Hier haben wir es also mit einer Interpretation zu tun, gemäß der die quantenmechanische Welt völlig deterministisch ist.

Ein weiterer wichtiger Interpretationsansatz ist die sog. Viele-Welten-Interpretation.¹⁷⁶ Auch diese Interpretation bemüht sich um einen konsistenten Umgang mit dem Messproblem. Sie vermeidet den Kollaps der Wellenfunktion dadurch, dass sich bei jeder Messung die Welt in so viele einzelne „Welten“ aufteilt, wie es mögliche Ausgänge des Messprozesses gibt. Dies mag auf den ersten Blick etwas abstrus anmuten, führt aber zu einer äußerst konsistenten Interpretation, sofern man bereit ist, die Kosten einer extrem „aufgeblähten“ Ontologie zu tragen. Ob diese Interpretation deterministisch ist, kann ich nicht ganz eindeutig beantworten. In der globalen Perspektive auf alle Verzweigungen und Welten ergibt sich sicherlich ein deterministisches Bild. Was dies allerdings lokal (also für einem bestimmten Zweig) bedeutet, ist eine diffizile Frage, die ich an dieser Stelle unbeantwortet lassen muss.

9.3 Zusammenfassung

Wir haben in diesem kurzen Exkurs einen Blick auf die moderne Physik geworfen. Der Blick war allerdings in der Tat kurz und dementsprechend oberflächlich. Viele interessante Punkte und Probleme wurden nur gestreift oder zum Teil auch gar nicht erwähnt. Dennoch war unser Ausflug sinnvoll.

Wir haben gesehen, dass die Frage nach dem Determinismus sich in unseren modernen Theorien ganz ähnlich darstellt, wie in den klassischen. Fragt man sich nämlich, ob die Theorien deterministisch sind, so ist keine eindeutige Antwort zu geben. Es gibt zahlreiche Probleme mit dem Determinismus, doch kein Argument vermag ihn letztlich endgültig zu widerlegen oder zu beweisen.

¹⁷⁵ Butterfield, S. 36.

¹⁷⁶ Rae, A. (1996): *Quantenphysik: Illusion oder Realität?*, Stuttgart: Reclam, S. 121-134.

In der speziellen Relativitätstheorie scheint es erst so, als würde der Determinismus der Theorie sich zeigen lassen. Sobald man allerdings auch Gravitationswechselwirkungen beachtet, treten Probleme auf. Geht man dann zur allgemeinen Relativitätstheorie über, wird die Situation noch problematischer, wofür unter anderem das Hole-Argument und Singularitäten verantwortlich sind. Ob man die Theorie letztlich noch als deterministisch betrachten kann, hängt auch hier von diffizilen Interpretationsfragen ab.

Ähnlich verhält es sich in der Quantentheorie. Dort gibt es verschiedene Interpretationsansätze, zwischen denen man empirisch nicht oder zumindest noch nicht unterscheiden kann. Manche dieser Ansätze sind indeterministisch, so wie die Kopenhagener Standardinterpretation, andere, wie die Bohmsche Quantenmechanik, sind deterministisch.

Das bedeutet, dass wir bei unseren modernen physikalischen Theorien letztlich nicht sagen können, ob diese Theorien (im Sinne von Butterfields Determinismusdefinition) deterministisch sind oder nicht. Deswegen können wir auf dieser Grundlage natürlich auch keine Aussage über die Wahrheit des Determinismus in unserer Welt machen. Allerdings ist es, wie an anderer Stelle schon erwähnt, fraglich, ob sich eine solche Aussage überhaupt treffen lässt, selbst wenn sich herausstellen sollte, dass unsere Theorien eindeutig deterministisch (oder indeterministisch) sind, denn diese Erkenntnis allein würde nicht ausreichen, um eine Aussage über die Welt zu rechtfertigen. Man bräuchte dazu des Weiteren eine exakte Kenntnis der Beziehung zwischen Theorie und Welt.

10. Determinismus als Eigenschaft unserer Welt

10.1 Das Theorie-Welt-Verhältnis

Wir sahen uns im Verlauf dieser Arbeit schon mehrfach mit dem folgenden Problem konfrontiert: Selbst wenn wir in der Lage wären abschließend zu klären, ob unsere physikalischen Theorien deterministisch oder indeterministisch sind, welche Bedeutung hätte diese Erkenntnis für unsere Welt?

Nehmen wir an, unsere physikalischen Theorien wären deterministisch.¹⁷⁷ Welchen Grund hätten wir anzunehmen, dass auch die Vorgänge in der Welt deterministisch sind? Schließlich, so könnte man argumentieren, haben sich alle unsere bisherigen Theorien im Laufe der Geschichte als falsch erwiesen. Da dies so ist, ist es wahrscheinlich, dass es unseren aktuellen Theorien ebenso ergehen wird.¹⁷⁸ Wenn wir aber davon ausgehen müssen, dass sich unsere Theorien als falsch erweisen werden, warum sollte es dann für unsere Frage eine Rolle spielen, ob diese Theorien deterministisch sind oder nicht?

Wenn man versuchen will, dieses Problem zu lösen, so muss man sich zuerst einmal verdeutlichen, dass es sich beim Determinismus um eine *Eigenschaft* von physikalischen Theorien handelt und nicht um einen unmittelbaren Inhalt der Theorien. Auch falsche Theorien können Eigenschaften haben, die Eigenschaften der Welt repräsentieren. Analog erscheint es uns schließlich auch nicht ungewöhnlich, dass „falsche“ Theorien von Entitäten handeln, die auch in der wirklichen Welt vorkommen.

Wenn sich nun in unserer bisherigen Untersuchung herausgestellt hätte, dass alle unsere Theorien deterministisch sind, dann hätte man zumindest ein Indiz dafür, dass „Deterministisch-sein“ eine fundamentale Theorieeigenschaft ist, die den Theorien eventuell deswegen zukommt, weil die Welt deterministisch ist.

Wissenschaftliche Realisten würden in dieser Weise argumentieren. Sie halten unsere aktuellen Theorien für zumindest näherungsweise wahr und glauben, dass uns diese Theorien schon ein (mehr oder weniger) gutes Bild davon vermitteln, wie die Welt wirklich beschaffen ist. Dazu könnte gehören, dass Enti-

¹⁷⁷ Die folgenden Überlegungen sind derart konzipiert, dass sie Argumente für den Determinismus unserer Welt liefern sollen. Natürlich ist es auch möglich analoge Argumente zu konstruieren, die den Indeterminismus der Welt plausibel machen sollen. Earman z.B. müsste diesen Weg gehen.

¹⁷⁸ Vgl. Laudan, S. 121-126.

täten und Eigenschaften der Theorien Entitäten und Eigenschaften repräsentieren, die in der Welt tatsächlich existieren.

Aber der Realist, der so argumentieren wollte, sieht sich mit folgender Problematik konfrontiert: Er muss die Überzeugung rechtfertigen, dass eine Eigenschaft, die allen bisherigen (bzw. unseren aktuell besten) Theorien zukommt, auch wirklich eine Eigenschaft der Welt ist. Diese Rechtfertigung könnte durch einen sog. Schluss auf die beste Erklärung versucht werden. Man würde dabei klassischerweise so argumentieren: Die beste Erklärung dafür, dass alle unsere bisherigen (bzw. unsere aktuell besten) Theorien deterministisch sind, ist, dass unsere Welt deterministisch ist. Die beste Erklärung für einen Sachverhalt ist wahrscheinlich (näherungsweise) wahr. Folglich ist unsere Welt wahrscheinlich deterministisch.¹⁷⁹

Um dieses Schlussprinzips rankt sich allerdings eine große Debatte in der zeitgenössischen Erkenntnis- und Wissenschaftstheorie¹⁸⁰ und seine Triftigkeit ist alles andere als unumstritten. So ist Bas van Fraassen der Auffassung, dass ein Schluss auf die beste Erklärung niemals epistemische Rechtfertigung gewährleisten kann.¹⁸¹ Dementsprechend hinge die Möglichkeit eines solchen Schlusses von den Eigenschaften der Theorien zu den Eigenschaften der Welt davon ab, ob sich dieses Schlussprinzip in überzeugender Weise gegen die entsprechenden Einwände verteidigen lässt.

Allerdings hätte man, selbst wenn diese Verteidigung des Schlusses auf die beste Erklärung gelänge, wohl kaum keine Idee, wie es um den Status des Determinismus in der Welt bestellt ist. Zumindest kann man aus den aktuellen Theorien keinen eindeutigen Hinweis auf die Wahrheit oder Falschheit des Determinismus gewinnen, denn dies hat unsere bisherige Untersuchung des Gegenstands eindeutig ergeben.

Wollte man dennoch für einen Determinismus (bzw. Indeterminismus) in der Welt argumentieren, so müsste man seine Argumente aus einer anderen Quelle beziehen. Man könnte z.B. argumentieren, dass es eine metaphysische Notwendigkeit ist, dass die Welt deterministisch oder indeterministisch ist. Ausgangspunkt solcher Überlegungen wäre aber nicht mehr die Physik oder die

¹⁷⁹ Vgl. hierzu beispielsweise: Lipton, Peter (2004): *Inference to the Best Explanation*, Second Edition, London/New York: Routledge.

¹⁸⁰ Einen guten Überblick über diese Debatte liefert ebenfalls Lipton.

¹⁸¹ Vgl. van Fraassen, B. (1989): *Laws and Symmetry*, Oxford/New York: Oxford University Press, S. 142-182.

physikalischen Theorien. Im Gegenteil, die Erklärungsrichtung wäre dann sogar eine andere. Wenn man z.B. auf Grund metaphysischer Argumente, zu der Überzeugung gelangt, dass die Welt deterministisch (oder indeterministisch) sein muss, dann würde das einen Grund dafür liefern, dass unsere physikalischen Theorien auch diese Eigenschaft haben müssen, sofern sie korrekte Weltbeschreibungen sein sollen. In dieser Weise ist z.B. Einsteins Kritik an der Quantenphysik zu verstehen. Seine Überzeugung, dass die Welt deterministisch organisiert sein muss, veranlasste ihn, die Unvollständigkeit der Quantentheorie zu postulieren. Die Quelle seiner Überzeugung kann aber nicht die Physik allein gewesen sein. Die Frage, die sich in solchen Fällen stellt, ist, ob sich solche Postulate empirisch überprüfen lassen. In Einsteins Fall wurden die, von ihm als unmöglich erachteten, EPR-Korrelationen empirisch nachgewiesen. Damit war Einsteins Unvollständigkeitseinwand zwar vorerst erledigt, da er sich aber bemüht hatte, aus seinen Einwänden empirische Konsequenzen abzuleiten, waren seine Zweifel für den Fortgang der Physik äußerst fruchtbar. Darüber hinaus haben wir bereits gehört, dass die Bohmsche Mechanik eine deterministische Theorie ist. Auch in ihr gibt es „versteckte Parameter“, die allerdings nicht-lokal sind, d.h. Einsteins Unvollständigkeitseinwand kehrt hier in gewisser Weise wieder.

Wenn man also Gründe für oder gegen den Determinismus der Welt nicht aus der Physik selbst gewinnt, dann sollte man sich sinnvollerweise fragen, ob diese Form von Determinismus auch empirisch überprüfbare Konsequenzen hat.

10.2 Ist die Rede vom Determinismus unserer Welt bedeutungslos?

Nico G. van Kampen argumentiert diesem Kontext dafür, dass die Rede vom Determinismus als Eigenschaft unserer Welt inhaltsleer und bedeutungslos sei, da diese Eigenschaft weder bewiesen noch widerlegt werden könne.¹⁸²

Seine Argumentation verläuft dabei in drei Schritten:

- a) Der Determinismus unserer Welt kann nicht widerlegt werden.
- b) Der Determinismus unserer Welt kann nicht bewiesen werden.
- c) Da der Determinismus unserer Welt weder bewiesen noch widerlegt werden kann, handelt es sich dabei um eine bedeutungslose und inhaltsleere Kategorie.

¹⁸² Vgl. hierzu und zum Folgenden: van Kampen, N. G. (1991): „Determinism and Predictability“. In: *Synthese* 89, S. 273-281, insbesondere S. 273-275

Zu a): Der Determinismus unserer Welt kann nicht widerlegt werden.

Für diese These argumentiert van Kampen folgendermaßen: Stellen wir uns vor, dass wir in einer nicht-deterministischen Welt A leben. Stellen wir uns darüber hinaus vor, dass wir die Fähigkeit besitzen, den Indeterminismus unserer Welt zu erkennen, dass wir also in der Lage sind, aus unseren Beobachtungen abzuleiten, dass bestimmte Ereignisse in A nicht determiniert sind.

Nun stellen wir uns noch eine zweite Welt B vor. Diese Welt ist vollkommen determiniert und zwar in der folgenden Weise: B und alles, was in B geschieht, ist eine exakte Kopie von dem, was in A eine Million Jahre zuvor geschah. Jeder Bewohner von B hätte genau das gleiche Recht, aus seinen Beobachtungen abzuleiten, dass er in einer nicht-deterministischen Welt lebt, wie sein Prototyp in A. Aber er würde sich irren. Deshalb wäre auch die Art und Weise, wie ein Bewohner von A den Determinismus seiner Welt widerlegt hat, falsch, da er ebenso wenig ausschließen kann, dass auch A eine exakte Kopie einer früheren Welt Z ist.

Meiner Meinung nach ist dies ein überzeugendes Argument van Kampens. Allerdings trifft es nur jemanden, der einen Indeterminismus auf Grund von Folgerungen aus der Empirie rechtfertigen möchte. Einem solchen Argumentationsversuch kann man tatsächlich immer ein skeptisches Szenario im Sinne van Kampens entgegenstellen. Aber muss man, um eine bestimmte Überzeugung zu rechtfertigen, tatsächlich jede potentielle Irrtumsmöglichkeit, jedes potentielle Irrtumsszenario ausschließen können? Wenn dies so ist, hat van Kampen Recht. Wenn es jedoch nicht so sein sollte, stellt sich die Frage, für wie wahrscheinlich man van Kampens Szenario wirklich hält. Ist dieses Szenario wirklich eine *relevante* Irrtumsmöglichkeit, die man ausschließen muss? Oder anders formuliert: Ist das Problem, das van Kampen aufwirft, mehr als das klassische Skeptizismusproblem? Sonst könnte man nämlich zumindest sagen, dass der Indeterminist zwar ein Problem mit dem Skeptizismus hat, aber nur genau das Problem, das jede andere nicht-skeptische Position hat.

Zu b): Der Determinismus unserer Welt kann nicht bewiesen werden.

Van Kampens erstes Argument sollte verdeutlichen, dass man den Determinismus unserer Welt nicht widerlegen kann. Selbst wenn dies stimmen sollte, wäre es dennoch denkbar, dass es möglich ist den Determinismus zu beweisen.¹⁸³ Van Kampen ist allerdings der Meinung, dass auch dies nicht möglich ist, weil wir in einem einzelnen Universum leben, dass aus einer einzigen Abfolge von Zuständen besteht. Es ist uns nicht möglich, zu beweisen, dass ein Zustand den jeweils nachfolgenden determiniert, weil wir einfach nicht wissen können, ob es noch andere mögliche Nachfolgezustände gegeben hätte. Wir sehen nur die eine Zustandsfolge, die tatsächlich stattfindet.

Van Kampen denkt den Determinismus hier in Kategorien von Ursache und Wirkung. Es gibt nur ein Universum und auf einen Zustand folgt schlichtweg immer der jeweils nächste. Da das so ist, haben wir keine Möglichkeit zu überprüfen, ob es für einen bestimmten Zustand eine Alternative gegeben hätte.

Van Kampen legt hierbei zwar ein Determinismusverständnis zugrunde, das wir aus verschiedenen Gründen zurückgewiesen haben. Aber ist sein Argument damit hinfällig?

Versuchen wir sein Argument auf Earman's Mögliche-Welten-Semantik zu übertragen. Earman hatte Determinismus wie folgt definiert:

„Letting \mathcal{W} stand for the collection of physically possible worlds, that is, possible worlds which satisfy the natural laws obtaining in the actual world, we can define the Laplacian variety of determinism as follows. The world $W \in \mathcal{W}$ is *Laplacian deterministic* just in the case for any $W' \in \mathcal{W}$, if W and W' agree at any time, then they agree for all times.“¹⁸⁴

Wir legen an dieser Stelle die starke Lesart der Definition zugrunde. Man könnte nun mit van Kampen argumentieren, dass wir lediglich in einer Welt leben. Es gibt nur die faktische Welt und die Rede von möglichen Welten ist vage und spekulativ. Wir haben Zugang zu den für uns relevanten möglichen Welten, den physikalisch möglichen Welten, mittels der Naturgesetze, denn physikalisch möglichen Welten sind die, in denen die gleichen Naturgesetze

¹⁸³ Van Kampens fiktives Szenario mit den Welten A und B funktioniert nur um zu zeigen, dass man den ontologischen Determinismus nicht widerlegen kann. Es funktioniert tatsächlich nicht, um zu zeigen, dass man ihn nicht beweisen kann.

¹⁸⁴ Earman, S. 13, Hervorhebung im Original.

wie in unserer Welt gelten. Die Frage ist allerdings, welche Kenntnis der Naturgesetze wir tatsächlich haben und haben können. So ist es durchaus denkbar, dass es zusätzliche Naturgesetze gibt, die wir noch nicht kennen oder vielleicht sogar nicht kennen können, die dafür sorgen, dass zwei physikalisch mögliche Welten, die zu einem Zeitpunkt übereinstimmen, dies zu einem anderen Zeitpunkt nicht tun, obwohl wir sie im Rahmen unserer Kenntnis der Naturgesetze für deterministisch gehalten haben. Letztlich bedeutet das, dass wir den Determinismus unserer Welt nur beweisen könnten, wenn wir über eine umfassende Kenntnis der Naturgesetze verfügen würden. Dass wir eine solche Kenntnis jemals erlangen, scheint aber nicht sehr wahrscheinlich zu sein.

Wiederum ist dies ein skeptisches Argument gegen den Determinismus unserer Welt und erneut kann man fragen, ob man eine solche Möglichkeit des Irrtums tatsächlich ausschließen muss. Ein Wissenschaftlicher Realist, der gleichzeitig Bohmianer ist, wäre eventuell der Meinung, dass man nicht ausschließen kann, dass es solche zusätzlichen, unbekanntenen und indeterministischen Naturgesetze gibt, aber dass es im Lichte unserer aktuellen Theorien höchst *unwahrscheinlich* ist. Damit wäre der Determinismus zwar nicht gerechtfertigt, aber doch wahrscheinlicher als der Indeterminismus. Mit einem solchen Argument hätten wir uns allerdings einmal im Kreis bewegt. Wenn man so argumentieren wollte, geht man nämlich den uns schon bekannten Weg: Man setzt sich mit dem Status des Determinismus in unseren wissenschaftlichen Theorien auseinander und versucht dann mittels einer realistischen Zusatzprämisse auf die ontologische Ebene zu wechseln. Damit wäre man allerdings wieder bei dem Argument angelangt, das im vorangegangenen Abschnitt dieses Kapitels diskutiert wurde. Van Kampen zieht aus seinem Argument aber noch eine Schlussfolgerung:

c) Da der Determinismus unserer Welt weder bewiesen noch widerlegt werden kann, handelt es sich dabei um eine bedeutungslose und inhaltsleere Kategorie.

Dies ist eine klassische Argumentationsstrategie. Es ist so etwas wie eine philosophische Grundsatzfrage, ob Fragen, die man nicht beantworten kann, wirklich sinnlose Fragen sind. Letztlich ist es meiner Meinung nach so, dass es korrekt ist, dass ein Skeptiker dem Determinist (oder Indeterminist) immer wieder aufzeigen kann, dass es keine endgültige Rechtfertigung seiner Position geben

kann, solange nicht der Skeptizismus widerlegt wird. Dementsprechend wird die Frage nach Wahrheit des Determinismus niemals endgültig entschieden werden können, selbst wenn man irgendwann zu einer finalen physikalischen Theorie (zu der es dann erwiesenermaßen auch noch keinen empirisch äquivalenten Rivalen geben dürfte) kommen sollte.

Auf der anderen Seite aber sträube ich mich dagegen, die Kategorie des Determinismus für bedeutungslos oder inhaltsleer zu erklären. Auf der ontologischen Ebene macht es einen Unterschied ums Ganze, ob der Determinismus in unserer Welt gilt ist oder nicht. Beispielsweise verdeutlicht das Problem des freien Willens, wie fundamental die Frage nach dem Determinismus unserer Welt für unser Selbstverständnis ist.

Auch wenn es keine endgültige Rechtfertigung des Determinismus oder des Indeterminismus geben kann, so heißt dies nicht, dass diese Frage es nicht wert ist, dass man sich mit ihr auseinandersetzt. Die Unmöglichkeit einer endgültigen Rechtfertigung bedeutet nicht, dass es nicht doch gute Gründe für die eine oder die andere Position geben kann (zwar nicht im Sinne einer absoluten Gewissheit, aber doch z.B. im Sinne einer hohen Wahrscheinlichkeit oder einer starken Überzeugung).

Man muss vielleicht bescheidener ansetzen und sich z.B., wie in dieser Arbeit geschehen, mit Fragen nach dem Status des Determinismus in unseren wissenschaftlichen Theorien auseinandersetzen. Daraus kann man einerseits interessante wissenschaftstheoretische Erkenntnisse gewinnen, auf die ich im nächsten Kapitel noch eingehen werde. Andererseits kann diese Analyse auch Rückschlüsse auf die Welt zulassen und zwar in der Form, dass sie bestimmte Positionen wahrscheinlicher macht als andere. Man erhält so zwar keine unanfechtbare Rechtfertigung, aber eben doch ggf. gute Gründe für die eine oder andere Position. Mit diesem bescheideneren Anspruch im Hinterkopf wäre die Frage nach dem Determinismus auch wieder eine empirische Frage, für deren Beantwortung Erkenntnisse der Naturwissenschaft eine Rolle spielten.

11. Determinismus als Theorietugend

Auch wenn die Frage nach dem Status des Determinismus sowohl in unseren Theorien als auch in der Welt nicht eindeutig zu beantworten ist, so bedeutet das natürlich nicht, dass der Determinismus in der Physik bedeutungslos ist. Im Gegenteil, als Theorietugend spielt er eine wichtige Rolle.

Hiermit möchte ich mich in diesem Kapitel auseinandersetzen. In diesem Zusammenhang werden verschiedene Überlegungen und Erkenntnisse aus den vorangegangenen Kapiteln wieder aufgegriffen werden.

11.1 Determinismus und Theorienideal

Im zweiten Kapitel dieser Arbeit habe ich die Frage gestellt, ob es so etwas wie ein Theorienideal der (klassischen) Physik gebe. Dabei wurde diskutiert, ob es eine Art Kriterienkatalog gebe, denen unsere physikalischen Theorien genügen müssen, um erfolgreich zu sein.

Doch es ist nicht die Intention dieser Arbeit, diese Frage umfassend zu beantworten. Das Ziel dieser Arbeit ist ein genügsameres. Sie konzentriert sich auf den Determinismus. Allerdings ist es äußerst nahe liegend anzunehmen, dass der Determinismus in einem solchen Theorienideal, sofern es eins gibt, eine tragende Rolle zu spielen hat.

Unsere Untersuchung hat jedoch gezeigt, dass der Status des Determinismus selbst in unseren klassischen Theorien höchst fragwürdig ist. Letztlich konnten weder die Argumente für den Determinismus noch die Argumente gegen den Determinismus in der klassischen Physik überzeugen. Es bleibt also zweifelhaft, ob unsere klassischen und auch unsere aktuellen Theorien einem Theorienideal genügen, zu dem der Determinismus gehört. Aber diese Erkenntnis trägt, streng genommen, nichts zur Beantwortung der Frage nach der Existenz eines solchen Theorienideals bei. Es kann trotzdem ein solches Ideal geben bzw. es kann sinnvoll sein ein solches Ideal anzustreben; nur unsere Theorien genügen eben diesem Ideal (noch) nicht.

Wenn wir also feststellen, dass unsere Theorien dem Theorienideal nicht genügen, so gibt es zwei mögliche Schlussfolgerungen: Entweder stellt dies ein Problem für unsere Theorien oder ein Problem für das Theorienideal dar.

Folglich muss man erörtern, warum es überhaupt ein solches Ideal geben sollte. Die Idee im zweiten Kapitel war, dass es bei der Frage nach dem Theorienideal, um die Frage nach Kriterien für *erfolgreiche* Theorien geht. Ein Theorienideal soll erfolgreiche Wissenschaft möglich machen.

Determinismus ist für erfolgreiche Wissenschaft von Bedeutung, da er eine Rolle für Vorhersage, Kontrolle und Erklärung von Phänomenen spielt.¹⁸⁵

Mithin scheint die Rolle des Determinismus in unseren Theorien mit der Existenz eines Theorienideals vereinbar zu sein. Das mag zwar stimmen, ist aber keineswegs zwingend. Ich bin der Auffassung, dass die Rede vom Theorienideal zu stark ist, denn ein Theorienideal beinhaltet Kriterien deren Erfüllung erfolgreiche Wissenschaft garantieren soll. Umgekehrt würde dies bedeuten, dass die Nichterfüllung der Kriterien des Theorienideals mit erfolgreicher Wissenschaft unvereinbar ist. Dies ist für mich nicht überzeugend, insbesondere wenn man bedenkt, dass nicht nur der Status des Determinismus in der Physik fragwürdig ist. Unsere physikalischen Theorien erfüllen auch alle anderen Kriterien des in Abschnitt 2.1.2 diskutierten, potentiellen Theorienideals nicht: Die Quantentheorie ist nicht-lokal, die Newtonschen Gesetze gelten ohnehin nur in der klassischen Physik, die Elektrodynamik enthält Inkonsistenzen¹⁸⁶ und das Paradigma des einfachen Systems wird durch die Chaosphysik hinfällig. Deshalb scheint es mir überzeugender zu sein, von Theorietugenden zu sprechen, die bestimmte Stärken von Theorien beschreiben. Theorien können bestimmte Tugenden haben, sie müssen sie aber nicht haben und hat man beispielsweise zwei konkurrierende Theorierivalen zur Auswahl, kann man eventuell mittels einer Abwägung zwischen diesen Tugenden einen der Rivalen auszeichnen.

Betrachten wir als Beispiel die Quantenmechanik: Die orthodoxe Formulierung hat gegenüber der Bohmschen den Vorteil der mathematischen Einfachheit. Die Bohmsche Formulierung ist dafür aber deterministisch und besitzt somit eventuell Vorteile im Hinblick auf Erklärungskraft. In der physikalischen Praxis verwendet man den orthodoxen Formalismus, weil man für die dortigen Zwecke dessen Tugenden bevorzugt.

An dieser Argumentation sieht man aber auch, wo ein Problem entsteht. Möchte man wirklich über Fundamentaltheorien reden, die einfangen (sollen), wie die Welt wirklich ist, muss man anders vorgehen. Eine Begründung der Theo-

¹⁸⁵ Welche Rolle genau, wird in den folgenden Abschnitten weiter ausgearbeitet werden.

¹⁸⁶ Dies zeigt Mathias Frisch in *Inconsistency, Asymmetry and Non-Locality*.

rienwahl auf Grund pragmatischer Gewichtungen bestimmter Theorietugend scheint hier keine adäquate Vorgehensweise zu sein.¹⁸⁷

11.2 Determinismus und Vorhersage

Wir haben gesehen, dass Determinismus und Vorhersage unterschiedliche Dinge sind, die man sorgsam auseinander halten muss. Zusätzlich habe ich dafür argumentiert, dass erfolgreiche Vorhersage und Kontrolle von Phänomenen eine Minimalbedingung für erfolgreiche Wissenschaft ist. Diese beiden Aspekte sollen im Folgenden in Beziehung zueinander gesetzt werden.

Bei der Diskussion chaotischer Systeme (Kapitel 8) haben wir herausgefunden, dass Determinismus keine hinreichende Bedingung für Vorhersagbarkeit sein kann. Es gibt offensichtlich deterministische Systeme, deren Verhalten man nicht vorhersagen kann.

Aber ist Determinismus eine notwendige Bedingung für die Vorhersage von Phänomenen? Auf diese Frage kann man antworten, dass dies auch nicht so ist. Probabilistische Gesetze erlauben uns relative Häufigkeiten vorherzusagen, ohne deterministisch zu sein. Will man jedoch mehr als nur statistische Vorhersagen, so ist Determinismus tatsächlich eine notwendige Bedingung. Nur wenn ein System deterministisch ist, kann man Vorhersagen für einzelne Ereignisse machen. Dies haben wir bereits in Abschnitt 8.4 herausgearbeitet. Damit ist Determinismus eine notwendige Voraussetzung für eine wichtige Klasse von Vorhersagen.

11.3 Determinismus und Erklärung

Im zweiten Kapitel haben wir uns nicht nur mit einem potentiellen Theorienideal der (klassischen) Physik beschäftigt, sondern uns auch mit dem Verhältnis von Determinismus und Erklärung auseinandergesetzt. Dabei haben wir erkannt, dass deterministische Theorien im Hinblick auf Erklärungskraft potentiell leistungsfähiger sind als indeterministische. Der Grund dafür ist, dass indeterministische Theorien zwangsläufig bestimmte Erklärungslücken enthalten.

¹⁸⁷ Bevorzugt man beispielsweise den orthodoxen quantenmechanischen Formalismus gegenüber dem Bohmschen Ansatz weil er mathematisch einfacher ist, so hat dies ausschließlich pragmatische Gründe. Dies lässt aber keine Aussage darüber zu, ob der orthodoxe Formalismus auch ein adäquatere Beschreibung der Welt ist, denn welchen Grund hätte man, anzunehmen, die Welt sei so strukturiert, dass sie mathematisch einfach beschreibbar ist. Zumindest müsste man erst zeigen, dass diese Eigenschaft wahrheitszutraglich ist.

Diesen Zusammenhang untersucht Christopher Hitchcock in seinem Aufsatz *Contrastive Explanation and the Demons of Determinism*.¹⁸⁸ Wir wollen uns seinen Argumentationsgang etwas genauer ansehen.

Kontrastive Erklärungen, so könnte man meinen, sind die Art von Erklärungen, die nur von deterministischen Theorien geleistet werden können.¹⁸⁹ Nur eine deterministische Theorie könnte erklären, warum ein radioaktives Atom genau zum Zeitpunkt x und nicht zum Zeitpunkt y zerfallen ist. Wenn kontrastive Erklärungen möglich sind, dann, so könnte man behaupten, ist das System, über das man spricht, auch deterministisch. Diese These bezeichnet Hitchcock als *CEID*-These (Contrastive Explanation implies Determinism).¹⁹⁰

Hitchcock möchte nun gegen die *CEID*-These argumentieren. Er ist der Auffassung, dass es sehr wohl indeterministische kontrastive Erklärungen geben kann. Um dies zu belegen, führt er verschiedene Beispiele an, die aus der weiteren Debatte um die Erklärungstheorie bekannt sind:¹⁹¹ Wenn z.B. David Lewis anstelle von Uppsala Monash besucht, weil er aus Monash eine Einladung erhielt, ist das eine kontrastive Erklärung. Aber damit ist keineswegs etwas darüber ausgesagt, dass Lewis' Kommen nach Monash determiniert war. Er hätte schließlich auch in Princeton bleiben können. Und dass Jones an progressiver Paralyse erkrankt und Smith nicht, kann dadurch erklärt werden, dass Jones im Gegensatz zu Smith an latenter, unbehandelter Syphilis erkrankt war. Latente, unbehandelte Syphilis ist nämlich eine notwendige Bedingung für das Erkranken an progressiver Paralyse. Dies determiniert aber noch lange nicht Jones Erkrankung, da nur ein ganz geringer Prozentsatz von Menschen, die an latenter, unbehandelter Syphilis leiden, auch an progressiver Paralyse erkranken. Auch in der Physik lassen sich entsprechende Beispiele finden: Ein vertikal polarisiertes Photon A trifft auf einen Polarisationsfilter, der in einem bestimmten Winkel α zur Vertikalen orientiert ist. Es gibt eine bestimmte Wahrscheinlichkeit P dafür, dass das Photon den Filter passiert, und eine bestimmte Wahrscheinlichkeit $1 - P$ dafür, dass es den Filter nicht passiert. Nehmen wir an A passiert den Filter. Nun trifft ein zweites Photon B, dessen Polarisationsrichtung orthogonal zur Ausrichtung des Filters ist, auf ebendiesen. Es passiert

¹⁸⁸ Hitchcock, Ch. (1999): „Contrastive Explanation and the Demons of Determinism“. In: *British Journal for the Philosophy of Science* 50, S. 585-612.

¹⁸⁹ Vgl. Abschnitt 2.1.1.

¹⁹⁰ Hitchcock, S. 586.

¹⁹¹ Vgl. ebd., S. 591.

den Filter nicht, weil die Wahrscheinlichkeit dafür null ist. Wir scheinen eine Erklärung dafür zu haben, dass A den Filter passiert hat und B nicht.

All diese Beispiele machen deutlich, dass die CEID-These falsch ist. Bedeutet das nun, dass der Determinismus, entgegen unserer bisherigen Annahme, für die Erklärungskraft einer Theorie doch keine Rolle spielt? Dies ist nicht der Fall. Um dies zu verdeutlichen, betrachten wir nicht die CEID-These, sondern die DICE-These (Determinism implies Contrastive Explanation). Diese DICE-These ist zwar offensichtlich auch nicht korrekt. Schließlich ermöglicht beispielsweise die Bohmsche Mechanik keine kontrastive Erklärung des Ergebnisses einer Quantenmessung, da die Variablen, die den Ausgang determinieren, „versteckte Variablen“ sind. Wenn man die determinierenden Variablen nicht kennt (oder sogar nicht kennen kann), ist auch keine kontrastive Erklärung möglich. Dennoch kann man konstatieren, dass Determinismus eine wichtige Theorieeigenschaft für die Erklärungskraft einer Theorie ist, denn man muss die DICE-These nur aufgrund epistemischer Bedingungen einschränken. Sie gilt aber insofern, dass der Determinismus *im Prinzip* kontrastive Erklärungen ermöglicht. Man muss allerdings Kenntnis der determinierenden Variablen haben, damit eine Erklärung faktisch möglich wird. Es ist zwar möglich, dass wir diese Kenntnis nicht besitzen. Dies ist aber ein rein epistemisches und kein grundsätzliches Problem.

In bestimmten Fällen versagt die Möglichkeit indeterministischer kontrastiver Erklärung hingegen und es gibt notwendigerweise eine Erklärungslücke.¹⁹² Deshalb ist der Determinismus im Hinblick auf die Erklärungskraft einer Theorie eine wichtige Theorieeigenschaft.

¹⁹² Gilt der Determinismus nicht, ist zwar eventuell auch eine kontrastive Erklärung eines Ereignisses möglich. Vielleicht ist sie aber auch unmöglich. Die Fälle, in denen indeterministische kontrastive Erklärungen möglich sind, scheinen bestimmte Sonderfälle zu sein und es bliebe die Aufgabe einer philosophischen Theorie der Erklärung, herauszuarbeiten, was genau den Sonderstatus dieser Fälle ausmacht.

12. Schlussbemerkungen

Zum Ende möchte ich noch einmal kurz die wichtigsten Ergebnisse meiner Untersuchung zusammenfassen.

Das zentrale Thema dieser Arbeit war die Frage nach dem Determinismus in unseren klassischen physikalischen Theorien.

Um die Auseinandersetzung mit dieser Frage zu ermöglichen, musste geklärt werden, was überhaupt unter Determinismus zu verstehen ist. Ich habe mich dazu entschlossen, die Determinismusdefinitionen von John Earman und Jeremy Butterfield in den Vordergrund zu rücken. Earman versucht mittels einer Mögliche-Welten-Semantik eine ontologische Definition des Determinismus zu geben. In diesem Zusammenhang habe ich dafür plädiert, zwischen einer starken und einer schwachen Lesart von Earmans Definition zu unterscheiden. Folgt man der starken Lesart, so ist der Determinismus eine potentielle Eigenschaft unserer Welt. Legt man hingegen die schwache Lesart zugrunde, so erhält man einen Sinn von Determinismus, wie er sich auch in Butterfields Definitionsversuch findet. Für Butterfield ist Determinismus eine Eigenschaft physikalischer Theorien. Im Vergleich der beiden Verständnisweisen ist die starke Lesart von Earman zwar die gehaltvollere, aber dafür besitzt Butterfields Definition bestimmte pragmatische Vorzüge.

Anhand dieser Definitionen wurde dann der Status des Determinismus in unseren klassischen physikalischen Theorien erörtert. Philosophen wie Earman und John Norton fordern mit ihren Argumenten die weit verbreitete Ansicht heraus, dass unsere klassischen Theorien vollkommen deterministisch sind. Diskutiert habe ich in diesem Zusammenhang vor allem Argumente, die die klassische Mechanik betreffen, nämlich das Space-Invaders-Argument und das Kuppel-Argument. Auch die Thermodynamik und die Elektrodynamik wurden untersucht. Allerdings zeigt meine Analyse, dass Earmans und Nortons Argumente nicht endgültig überzeugen können und noch weiterer Rechtfertigung bedürfen. Dies heißt jedoch nicht, dass damit der Determinismus in der klassischen Physik gerettet ist. Vielmehr bleibt die Frage nach dem Status des Determinismus weiterhin unbeantwortet.

Dies waren die, in meinen Augen, wichtigsten Aspekte meiner Arbeit. Die Berücksichtigung der sog. Chaosphysik zeigte darüber hinaus, warum Determi-

nismus und Vorhersage von einander unterschieden werden müssen und welches Verhältnis zwischen beiden besteht. Ein Exkurs in die Relativitätstheorie und die Quantenphysik ergab, dass der Status des Determinismus auch in unseren modernsten physikalischen Theorien problematisch ist.

All diese Überlegungen wurden überdies eingebettet in einige Gedanken, die klären sollten, welche Rolle der Determinismus überhaupt in unseren physikalischen Theorien spielt und spielen kann. Das Ergebnis dieser Untersuchung war, dass er nicht konstitutiv für die Physik als Wissenschaft ist, sondern dass es sich beim Determinismus vielmehr um eine bestimmte Theorietugend handelt. Genauer gesagt ist der Determinismus eine Theorietugend, die von großer Bedeutung im Hinblick auf die Erklärungskraft und die Vorhersagekompetenz unserer Theorien ist. Dementsprechend musste dann auch das Verhältnis von Determinismus, Erklärungskraft und Vorhersage genauer unter die Lupe genommen werden.

Ein weiterer wichtiger Aspekt, der in dieser Arbeit angesprochen wurde, ist die Frage, welche Rückschlüsse auf unsere Welt Überlegungen zum Status des Determinismus in unseren physikalischen Theorien überhaupt zulassen. Es erscheint äußerst problematisch, von den Eigenschaften unserer Theorien auf Eigenschaften der Welt schließen zu wollen. Dies funktioniert, wenn überhaupt, nur mit einer realistischen Zusatzprämisse. In dieser Arbeit wurde verdeutlicht, dass es für einen solchen Schluss keine überzeugende Rechtfertigung geben kann. Dennoch bin ich der Meinung, dass uns Überlegungen in dieser Richtung zumindest gute Gründe für bestimmte ontologische Überzeugungen liefern können. Die Rede von und das Nachdenken über den Determinismus oder Indeterminismus unserer Welt ist in meinen Augen nicht sinn- und bedeutungslos. Vielmehr ist diese Frage sowohl für wissenschaftstheoretische Fragestellungen als auch für unser Welt- und Selbstverständnis von höchster Relevanz.

Allerdings könnte es sein, dass der Leser nach der Lektüre dieser Arbeit etwas enttäuscht ist. Weder zum Status des Determinismus in unseren physikalischen Theorien noch zu seinem Status in der Welt wird in dieser Arbeit endgültig Position bezogen. Es werden lediglich Probleme aufgezeigt und offene Fragen diskutiert, aber man bekommt nur bedingt Antworten präsentiert. Wollte mir jemand dies zum Vorwurf machen, so kann ich ihm nur mit einem Zitat von

Joel Lebowitz antworten. Das Zitat entleihe ich von Lawrence Sklar, der es in seinem Buch *Physics and Chance* ebenfalls als Schlusswort bemüht. Lebowitz sagt über philosophische Probleme, die sich im Rahmen der Statistischen Physik ergeben, das Folgende:

„I do not know if anyone is making bets on the eventual resolution of the apparent paradoxes relating to the coexistence, in the description of the same phenomena, of both determinism and randomness, reversibility and time asymmetry, and so on. If there are people betting, however, I would be very happy to be the banker and keep the money until everyone has agreed on the matter.”¹⁹³

Und selbiges gilt auch für mich und die in meiner Arbeit diskutierte Thematik.

¹⁹³ Lebowitz, J.; zitiert nach: Sklar, L. (1993): *Physics and Chance – Philosophical Issues in the Foundations of Statistical Mechanics*; Cambridge: Cambridge University Press, S. 420.

13. Literatur

Albert, D. Z. (1992): *Quantum Mechanics and Experience*, Cambridge/ London: Harvard University Press.

Alper, Joseph S.; Bridger, Mark; Earman, John; Norton, John (2000): „What is a Newtonian System? The Failure of Energy Conservation and Determinism in Supertasks”. In: *Synthese* 124, S. 281-293.

an der Heiden, U. (1996): „Chaos und Ordnung, Zufall und Notwendigkeit“. In: Küppers, G. (Hrsg.): *Chaos und Ordnung – Formen der Selbstorganisation in Natur und Gesellschaft*, Stuttgart: Reclam.

Bacciagaluppi, G. (2004): „The Role of Decoherence in Quantum Theory”. In: *Stanford Encyclopedia of Philosophy*, <http://www.science.uva.nl/~seop/entries/qm-decoherence/>, Stand:12.04.2005.

Bartels, A. (1996): *Grundprobleme der modernen Naturphilosophie*, Paderborn: Schöningh.

Boyd, R. (1996): „Realism, Approximate Truth, and Philosophical Method“. In: Papineau, D. (Hrsg.): *The Philosophy of Science*, Oxford, New York: Oxford University Press, S. 215-255.

Butterfield, J. (1998): „Determinism and Indeterminism”. In: *Routledge Encyclopedia of Philosophy*, Volume 3, London/New York: Routledge.

Carroll, J. W. (2003): „Laws of Nature”. In: *Stanford Encyclopedia of Philosophy*, <http://plato.stanford.edu/entries/laws-of-nature/>, Stand: 27.02.2006.

Cartwright, N. (1998): „Causation“. In: Craig, E. (Hrsg.): *Routledge Encyclopedia of Philosophy*, Vol. 2, London, New York: Routledge, S. 244-251.

Chalmers, A. F. (2001): *Wege der Wissenschaft: Einführung in die Wissenschaftstheorie*, Hrsg. von Niels Bergemann; Christine Altstötter-Gleich, 5., völlig überarbeitete und erweiterte Auflage, Berlin/Heidelberg/New York: Springer.

Earman, J. (1986): *A Primer on Determinism*, Dordrecht/Boston/Lancaster: D. Reidel.

Einstein, A. (1948): „Quanten-Mechanik und Wirklichkeit“. In: *Dialectica* 2, Paris: Presses Universitaires de France.

Field, H. (2003): „Causation in a Physical World“. In: Loux, M.J., Zimmermann, D. W. (Hrsg): *The Oxford Handbook of Metaphysics*, Oxford, New York: Oxford University Press, S. 435-487.

Fließbach, T. (1999): *Lehrbuch zur theoretischen Physik, Band 1: Mechanik*, Heidelberg/Berlin/Oxford: Spektrum Akademischer Verlag.

Frisch, M. (2005): *Inconsistency, Asymmetry and Non-Locality: a Philosophical Investigation of Classical Electrodynamics*, Oxford/New York: Oxford University Press.

Gerthsen, Ch.; Vogel, H. (1999): *Gerthsen Physik*, Berlin/Heidelberg/New York: Springer.

Gerver, J.L. (1984): „A Possible Model for a Singularity without Collisions in the Five Body Problem“. In: *Journal of Differential Equations* 52, S. 76-90;

Ghirardi, G. (2002): „Collapse Theories“. In: *Stanford Encyclopedia of Philosophy*, <http://www.science.uva.nl/~seop/entries/qm-collapse/>, Stand:12.04.2005.

Greulich, W. (Hrsg.) (1999): *Lexikon der Physik*, Band 2, Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.

Healey, R. (1994): „Nonseparable Process and Causal Explanation“. In: *Studies in the History and Philosophy of Modern Science* 25, S. 337-374.

Hitchcock, Ch. (1999): „Contrastive Explanation and the Demons of Determinism“. In: *British Journal for the Philosophy of Science* 50, S. 585-612.

Hofer, C. (2003): „Causal Determinism“. In: *Stanford Encyclopedia of Philosophy*,
<http://plato.stanford.edu/entries/determinism-causal/>, Stand: 05.02.2006.

Hutchison, K. (1993): „Is Classical Mechanics Really Time-reversible and Deterministic?“. In: *British Journal for the Philosophy of Science* 44; S. 307-323.

Hüttemann, Andreas (Hrsg.) (2003): *Determinism in Physics and Biology*, Paderborn: Mentis.

Joos, E.: *Elements of Environmental Decoherence*,
<http://www.decoherence.de/9908008.pdf>, Stand 01.07.2005.

Kiefer, C. (2003): *Quantentheorie*, Frankfurt am Main: Fischer Taschenbuch Verlag.

Kiefer, C.; Joos, E.: *Decoherence: Concepts and Examples*,
<http://www.decoherence.de/9803052.pdf>, Stand 01.07.2005.

Küppers, G (1996): „Chaos: Unordnung im Reich der Gesetze“; In: Küppers, G. (Hrsg.): *Chaos und Ordnung – Formen der Selbstorganisation in Natur und Gesellschaft*, Stuttgart: Reclam.

Kuypers, F.: *Klassische Mechanik*, 7. Auflage, Weinheim: WILEY-VCH Verlag.

Laplace, P. S. de (1932): *Philosophischer Versuch über die Wahrscheinlichkeit*, Hrsg. von Richard von Mises, Leipzig: Akademische Verlagsgesellschaft Leipzig.

Laraudogoitia: J. P. (2004): „Supertasks“; in: *Stanford Encyclopedia of Philosophy*,
<http://plato.stanford.edu/entries/spacetime-supertasks/>, Stand: 01.03.2006.

Laudan, L. (1981): „A Confutation of Convergent Realism“. In: Papineau, D. (Hrsg.) (1996): *The Philosophy of Science*, Oxford, New York: Oxford University Press, S. 107-138.

Lewis, D. (1973): *Counterfactuals*; Cambridge: Harvard University Press.

Lipton, Peter (2004): *Inference to the Best Explanation*, Second Edition, London/New York: Routledge.

Mather, J.N.; McGehee, R. (1975): „Solutions of the Collinear Four-Body Problem“. In: Moser, J. (Hrsg.): *Dynamical Systems, Theory and Applications*, New York: Springer.

Norton, J. (2003): „Causation as Folk Science“. In: *Philosophers' Imprint* Vol.3, No.4, <http://www.philosophersimprint.org/003004/>, Stand 22.02.2006.

Norton, J. (2004): „The Hole Argument“. In: *Stanford Encyclopedia of Philosophy*,
<http://plato.stanford.edu/entries/spacetime-holearg/>, Stand: 22.02.2006.

Rae, A. (1996): *Quantenphysik: Illusion oder Realität?*, Stuttgart: Reclam.

Sklar, L. (1993): *Physics and Chance – Philosophical Issues in the Foundations of Statistical Mechanics*; Cambridge: Cambridge University Press.

van Fraassen, B. (1989): *Laws and Symmetry*, Oxford/New York: Oxford University Press.

van Fraassen, B. (1980): *The Scientific Image*, Oxford/New York: Oxford University Press.

van Kampen, N. G. (1991): „Determinism and Predictability“. In: *Synthese* 89, S. 273-281.

Xia, Z. (1992): „The Existence of Noncollision Singularities in Newtonian Systems“, In: *Annals of Mathematics* 135, S. 411-468.

14. Abbildungsnachweise

Abbildung 1 entnommen aus: Hoefler, C. (2003): „Causal Determinism“. In: *Stanford Encyclopedia of Philosophy*,
<http://plato.stanford.edu/entries/determinism-causal/>, Stand: 05.02.2006.

Abbildung 2 entnommen aus: Earman, J. (1986): *A Primer on Determinism*, Dordrecht/Boston/Lancaster: D. Reidel, S.34.

Abbildung 3 entnommen aus: Norton, J. (2003): „Causation as Folk Science“. In: *Philosophers' Imprint* Vol.3, No.4,
<http://www.philosophersimprint.org/003004/>, Stand 22.02.2006, S.9.

Abbildung 4 entnommen aus: Küppers, G (1996): „Chaos: Unordnung im Reich der Gesetze“; In: Küppers, G. (Hrsg.): *Chaos und Ordnung – Formen der Selbstorganisation in Natur und Gesellschaft*, Stuttgart: Reclam, S.163.

Abbildung 5 entnommen aus: Küppers, G (1996): „Chaos: Unordnung im Reich der Gesetze“; In: Küppers, G. (Hrsg.): *Chaos und Ordnung – Formen der Selbstorganisation in Natur und Gesellschaft*, Stuttgart: Reclam, S.165.

Abbildung 6 entnommen aus: Küppers, G (1996): „Chaos: Unordnung im Reich der Gesetze“; In: Küppers, G. (Hrsg.): *Chaos und Ordnung – Formen der Selbstorganisation in Natur und Gesellschaft*, Stuttgart: Reclam, S.166.

15. Erklärung

Ich versichere, dass ich die schriftliche Hausarbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Alle Stellen der Arbeit, die anderen Werken dem Wortlaut oder Sinn nach entnommen wurden, habe ich in jedem Fall unter Angabe der Quelle als Entlehnung kenntlich gemacht. Das gleiche gilt auch für die beigegebenen Zeichnungen, Kartenskizzen und Darstellungen.

Datum

Unterschrift