

Philosophie der Physik

Christian Wüthrich

Version vom 24. Dezember 2015

Abstract

Dieser Artikel gibt eine Einführung in die zeitgenössische Philosophie der Physik. Dies geschieht zum einen Teil am Beispiel der Philosophie von Raum und Zeit, die eine zentrale Stellung einnimmt. Mit Raum und Zeit werden die Relativitätstheorie und ihre Erweiterungen zentral, und damit auch die philosophische Betrachtung dieser Theorien. Andererseits behandelt der Artikel wichtige Themen in der Philosophie der Quantentheorie.

1 Einleitung

In der Philosophie der Physik kann man unscharf zwei Hauptrichtungen erkennen. Zum einen findet man was man als *Philosophie* der Physik in einem engeren Sinne bezeichnen mag; darin werden originär philosophische Fragestellungen an die Physik herangetragen und mit deren Hilfe zu beantworten versucht. Als Beispiele dafür dienen etwa die Frage, ob unsere Welt deterministisch oder indeterministisch sei, oder die Frage nach den fundamentalen Bausteinen der Natur, oder, etwas spezifischer vielleicht, die Frage, ob es denn ein physisches Korrelat der von uns in der Welt gesehenen oder in die Welt hineinprojizierten Kausalzusammenhänge gebe. Die Determinismus-Frage zum Beispiel, obwohl von ihrem Ursprung her der Philosophie zuzuordnen, muss mit den Ressourcen der Physik beantwortet werden: man untersucht dabei, ob unsere besten physikalischen Theorien deterministisch oder indeterministisch sind. Obwohl dazu der philosophische Begriff einer deterministischen Theorie geschärft wird—und geschärft werden muss—, zeigt sich bei einer solchen Analyse, dass die Antwort überraschend schwer fällt. Zudem ist es nicht klar, ob nicht Grenzen unserer Erkenntnisfähigkeit uns grundsätzlich davon abhalten, die Antwort je zu kennen (Wüthrich 2011 und Referenzen darin).

Zum andern gibt es die *Grundlagen* der Physik, worin eigentlich physikalische Fragestellungen mit in einem weit gefassten Sinn philosophischen Methoden behandelt werden. Das traditionell wichtigste Beispiel dabei ist das Messproblem in der Quantenmechanik und damit verbunden das grundsätzliche Problem der Interpretation der Quantenmechanik. Das Messproblem tritt bereits in der nicht-relativistischen Quantenmechanik auf und muss für ein kohärentes Verständnis der Theorie notwendigerweise aufgelöst werden.¹ Dabei hat die Philosophie der Physik gerade in den 1990er Jahren wichtige Beiträge zur Schärfung der Problemstellung erbracht. Weitere wichtige Beispiele in dieser Kategorie sind die Reduktion des Zweiten Hauptsatzes der

¹ Zumindest wenn die Theorie realistisch aufgefasst wird, d.h., wenn die Theorie als eine Theorie *über unsere Welt* angeschaut wird (vgl. Abschnitt 3).

Thermodynamik auf die statistische Physik. Diese Reduktion ist deshalb nicht-trivial weil der Zweite Hauptsatz ganz klar eine zeitliche Asymmetrie zwischen Vergangenheit und Zukunft impliziert—die gesamte Entropie eines geschlossenen Systems kann in zeitlicher Richtung nur zu- aber nicht abnehmen—, die klassische statistische Physik aber gemeinhin als zeitumkehrinvariante Theorie gilt, d.h., als Theorie die die beiden zeitlichen Richtungen von Vergangenheit zu Zukunft und von Zukunft zu Vergangenheit als gleichwertig betrachtet. Schliesslich ist auch die im nächsten Abschnitt behandelte Debatte zwischen Leibniz und Newton ein wichtiges Beispiel einer philosophischen Grundlagendebatte in der Physik.

Diese Unterteilung der Philosophie der Physik in zwei Grundkategorien soll nicht den falschen Eindruck erwecken, dass sämtliche oder schon nur die meisten Fragestellungen klar in einen der beiden Bereiche fallen. Oft zeichnet sich erfolgreiche Arbeit in der Philosophie der Physik gerade dadurch aus, dass die Analyse unablässig vor und zurück in beiden Richtungen betrieben wird, ohne sich dabei um disziplinäre Grenzen zu kümmern. Damit werden „eigentlich physikalische“ oder „originär philosophische“ Fragestellungen höchstens noch graduell unterscheidbar. In einer ersten Näherung sind diese beiden ‚Richtungen‘ eher so etwas wie ‚Modi‘, wonach man entweder von der Physik oder der Philosophie ausgeht und sich dem andern Ende sozusagen annähert. Viele Arbeiten in der Philosophie der Physik sind so interdisziplinär—‚treffen‘ sich gewissermassen in der Mitte zwischen Physik und Philosophie—, dass es unmöglich wird, letztlich eine prinzipielle Trennung zwischen der Physik und der Philosophie zu ziehen. Hier gehen Philosophie und Physik nahtlos Hand in Hand.

Zudem ist das Verhältnis von Philosophie und Physik durch die Geschichte hindurch alles andere als konstant geblieben. Betrachten wir die historische Entwicklung, dann erkennen wir, dass zunächst für eine sehr lange Zeitspanne—von der Antike bis zur wissenschaftlichen Revolution im 16. und 17. Jahrhundert—die Physik ein zentraler Aspekt der Naturphilosophie, und damit ein wichtiger, aber eigentlicher, Teil der Philosophie, war. Auch in und nach der wissenschaftlichen Revolution bis hin zu Kant blieb die Physik mit der Philosophie eng verwoben und eine eigenständige Philosophie der Physik im obigen Sinn ist—wenn überhaupt—nur schwer zu erkennen. Eine solche Philosophie der Physik tritt vielleicht bei Kant oder spätestens im logischen Positivismus zum ersten Mal als eine selbstständige und selbstreflektierte Unternehmung auf. Die zeitgenössische Philosophie der Physik bleibt dem logischen Positivismus bis heute stark verbunden, was auch damit zu tun hat, dass zumindest im englischsprachigen Raum die logischen Positivisten viele der gegenwärtig führenden Philosophen und Philosophinnen der Physik direkt oder indirekt ausgebildet haben.

Der vorliegende Artikel wird im abschliessenden Abschnitt 5 kurz auf das heutige Verhältnis zwischen der Philosophie und der Physik zurückkommen. Davor behandeln Abschnitte 2 und 3 metaphysische, und insbesondere ontologische, Aspekte und Abschnitt 4 widmet sich erkenntnistheoretischen, und insbesondere methodologischen, Fragestellungen der Philosophie der Physik. Die Struktur des Kapitels ist also in erster Linie thematisch motiviert; zu den Themen in allen Abschnitten kann man sowohl Arbeiten, die tendenziell eher der einen als der andern der oben unscharf umrissenen

„Hauptrichtungen“ zuzuordnen sind, als auch solche, die nicht so zuordenbar sind, ausmachen.

Im Abschnitt 2 wird nach der Existenz und der Natur von Raum und Zeit gefragt. Dabei beginne ich mit der klassischen Debatte zwischen dem Relationalisten Gottfried Wilhelm Leibniz und seinen substantialistischen Widersachern Isaac Newton und Samuel Clarke, gehe zur Interpretation der allgemeinen Relativitätstheorie über, und schliesse mit der scheinbaren Implikation zeitgenössischer Theorien der Quantengravitation, dass Raum und Zeit fundamental überhaupt nicht existieren und bloss ‚emergente‘ Phänomene sind, ab.

Im Abschnitt 3 wende ich mich der philosophischen Behandlung von physikalischen Theorien der Materie zu. Hier werden natürlich verschiedene Theorien der Quantenphysik die Hauptrolle spielen. Dabei wird einerseits das berühmte ‚Messproblem‘ der Quantenmechanik thematisiert und andererseits das Verhältnis zwischen der wie auch immer fundamental gearteten Materie und der sie enthaltenden Raumzeit diskutiert. Es ist klar, dass das Resultat nicht zuletzt auch davon abhängen wird, ob denn fundamental überhaupt eine Raumzeit vorhanden ist.

Schliesslich werden im Abschnitt 4 zwei methodologische Problemstellungen analysiert, die in der letzten Zeit in der Philosophie der physikalischen Wissenschaften grosse Prominenz errungen haben. Beide betreffen die Möglichkeit und eventuell die Reichweite nicht-empirischer Theorienbestätigung, oder zumindest der nur sehr eingeschränkt oder indirekt empirischen Theorienbestätigung. Erstens entfernen sich fundamentale Theorien der Physik, wie wir sie zum Beispiel in der Quantengravitation finden, immer weiter von den traditionell empirischen Methoden der Mutterdisziplin. Folglich drängt sich hier die Frage nach möglichen alternativen, nicht-empirischen Methoden der Bestätigung auf. Zweitens muss die Kosmologie damit umgehen, dass das Universum im Gegensatz zum Untersuchungsgegenstand anderer Wissenschaften einmalig ist und typischerweise keine direkte Beobachtung wichtiger Grössen, wie zum Beispiel der Anfangsbedingungen im sehr frühen Universum, zulässt. Zudem erwachsen der Kosmologie Schwierigkeiten der Selbstlokalisierung und der verzerrten Auswahl der Evidenz, und sie muss sich philosophischen Debatten zur geforderten Erklärungsleistung stellen.

2 Ontologische Aspekte: Raum und Zeit

Zu den zentralen ontologischen Betrachtungen einer philosophischen Beurteilung physikalischer Theorien zählt ohne Zweifel die Frage nach den fundamentalen Bestandteilen und nach der Beschaffung der Materie. Die Gesamtheit des materiellen Gehalts des Universums wird dabei traditionellerweise als dadurch gegeben angeschaut, was in Raum und Zeit existiert, anders etwa als—falls sie existieren—Gott, mentale Entitäten und mathematische Objekte und andere Abstrakta. Materielle Objekte zeichnen sich danach unter den verschiedenen Arten von Entitäten gerade dadurch aus, dass sie raumzeitlich sind. Damit wird klar, dass nicht nur der ontologische Status der elementaren Konstituenten der Materie am Anfang steht, sondern auch derjenige von

Raum und Zeit selber. Letzterer soll in diesem Abschnitt behandelt werden; ersterer im nächsten.

Die Debatte zwischen Leibniz und Newton, respektive seinem Sprachrohr Samuel Clarke, steht am Anfang der modernen Entwicklungen in der Ontologie von Raum und Zeit.² Nach Newton sind Raum und Zeit unendlich und unendlich teilbar, völlig homogen und selbstähnlich, euklidisch in ihrer Geometrie, und vor allem sind sie eigenständige Substanzen, d.h., sie existieren unabhängig von ihrem Materiegehalt. Letzteres impliziert insbesondere, dass ein leerer Raum und eine leere Zeit existieren können. Raum und Zeit sind alles Materielle durchdringende, unverrückbare Medien die sich *ad infinitum* erstrecken. Dabei verbindet eine primitive—also nicht weiter analysierbare—Relation der räumlichen oder raumzeitlichen ‚Lokalisiertheit‘ materielle Objekte mit den Orten im Raum oder in der Raumzeit. Diese Position wird *Substantialismus* genannt.

Leibniz hält dem Substantialismus entgegen, dass dadurch, dass materielle Objekte ihre räumlichen oder raumzeitlichen Eigenschaften von der Raum- oder Raumzeitregion, die sie besetzen, gewissermassen erben, eine zusätzliche, nicht beobachtbare und theoretisch redundante ontische Ebene zwischen die Objekte eingeschoben wird. Diese Ebene ist deshalb nicht beobachtbar, weil wir immer nur räumliche (oder eventuell raumzeitliche) Distanzen zwischen Objekten beobachten, aber niemals wie sie im Raum oder in der Raumzeit selber lokalisiert sind. Statt Relationen zwischen Objekten und Orten haben wir bloss Objekte, die in räumlichen oder raumzeitlichen Beziehungen stehen. Deshalb sind Raum und Zeit für Leibniz etwas bloss Relatives, d.h., sie sind nicht absolut und deshalb auch keine eigenständigen Substanzen. Der Raum ist nichts anderes als die Ordnung der koexistierenden materiellen Substanzen; die Zeit ist nichts als die Ordnung des Aufeinanderfolgens von Ereignissen. Raum und Zeit existieren bloss insofern die materielle Existenz raumzeitlich geordnet ist. Ohne Materie gibt es nichts, das so zu ordnen wäre und deshalb kann weder ein leerer Raum noch eine leere Zeit existieren. Zumindest in der kruden Form der leibnizschen Position existieren nicht einmal raumzeitliche Orte, die von keinem materiellen Objekt eingenommen werden. Diese Position heisst *Relationalismus*.

Ein Vorteil, den Leibniz in seiner berühmten Korrespondenz mit Clarke für den Relationalismus (des Raumes) reklamiert, erwächst aus der Ununterscheidbarkeit gewisser verwandter Situationen. Etwas anachronistisch kann man drei Arten von räumlichen Verschiebungen unterscheiden. Erstens haben wir *statische Verschiebungen*, bei denen der gesamte materielle Inhalt des Universums gleichmässig um eine konstante Strecke verschoben wird, so dass die relativen Distanzen und Bewegungen zwischen den Objekten gleich bleiben. Zweitens gibt es *kinematische Verschiebungen*, bei denen der Bewegungszustand aller Körper ohne diese zu beschleunigen so verändert wird, dass die relativen Distanzen und Bewegungen unverändert bleiben. Schliesslich existieren noch *dynamische Verschiebungen*, bei denen alle Materie im Universum um den gleichen

² Vgl. Kapitel 6 in Earman 1989; obwohl nicht mehr ganz aktuell, liefert dieses Buch immer noch eine der besten Einführungen in die Philosophie von Raum und Zeit und speziell in einige der hier behandelten Fragestellungen.

Betrag und in die gleiche Richtung beschleunigt wird, ohne dass dabei die relativen Distanzen oder Bewegungen zwischen den Körpern verändert werden.

Wie Leibniz erkannt hat, ist nun die gesamte Newtonsche Physik so beschaffen, dass weder die absolute Position noch die absolute Geschwindigkeit eine physikalisch relevante Rolle spielen. Da zwei Situationen, die sich um eine statische oder um eine kinematische Verschiebung unterscheiden, nur um absolute Positionen und Geschwindigkeiten verschieden und deshalb in allen physikalisch relevanten Grössen identisch sind, sind statische und kinematische Verschiebungen nicht detektierbar. Durch solche Verschiebungen verwandte Situationen sind deshalb ununterscheidbar. Nach Leibniz' berühmtem Prinzip der Identität des Ununterscheidbaren sind deshalb diese beiden Situationen in Tat und Wahrheit ein und dieselbe. Weil aber der Substantialismus auf einem Unterschied zwischen den beiden Situationen bestehen muss, ist er falsch.

Dem kann man entgegenhalten, dass das für dieses Argument notwendige Prinzip der Identität des Ununterscheidbaren alles andere als unumstritten ist.³ Zudem kann eine Substantialistin abstreiten, dass die zwei Situationen bloss weil sie sich in beobachtbaren Grössen nicht unterscheiden auch ununterscheidbar *simpliciter* sein müssen. Allerdings scheint dieser Ausweg einer *empiristischen* Substantialistin nicht zugänglich. Falls das Prinzip also akzeptiert wird, so zeigt Leibniz' Argument zumindest eine Spannung zwischen Substantialismus und Empirismus auf. Es scheint, als ob der Substantialismus an dieser Stelle die ontische Stipulation von Raum und Zeit durch andere—theoretische—Tugenden einer solchen Stipulation rechtfertigen muss.

Dieses Argument übersieht allerdings die dritte Art von Verschiebungen, der dynamischen nämlich. Im berühmten Scholium zu den Definitionen in der *Principia* argumentiert Newton, dass, obwohl Raum und Zeit selber nicht direkt beobachtbar sind (und deshalb auch absolute Positionen und Geschwindigkeiten nicht), sie sehr wohl beobachtbare Konsequenzen haben. Dies zeigt er am Beispiel des sogenannten ‚Eimer-Gedankenexperiments‘ auf. Dieses Gedankenexperiment vergleicht zwei Situationen, die sich durch eine gleichmässige Rotation—also durch eine absolute Beschleunigung—unterscheiden. In der ersten Situation stehen sowohl der aufgehängte runde Eimer als auch das darin enthaltene Wasser still, d.h., sie rotieren relativ zum Laborsystem nicht. Im zweiten Fall rotieren beide um die an der Symmetrieachse angebrachte Aufhängung. Newton zeigt, dass die beiden Situationen sich durch Effekte der Fliehkraft und also durchaus auf eine beobachtbare Weise unterscheiden—in der ersten Situation bleibt die Wasseroberfläche flach, in der zweiten wird sie konkav. Das Problem für den Relationalisten ist, so Newton, dass die beiden Situationen *nur* durch eine absolute aber nicht durch eine relative Beschleunigung verschieden sind. Dem Relationalisten fehlen deshalb schlicht und einfach die Ressourcen, um die Physik adäquat zu beschreiben. Über mehrere Jahrhunderte bleibt dieses Problem für den Relationalismus bestehen. Erst im späten 19. Jahrhundert findet Ernst Mach einen raffinierten Ausweg: die beobachteten Konsequenzen der Fliehkraft können statt durch eine absolute Rotation des nahen Systems durch eine Rotation der fernen Sternmassen erzeugt werden. Damit kann

³ Vgl. Black 1952.

wiederum nur eine relative Beschleunigung zwischen dem Wasser im Eimer und den fernen Sternmassen des Universums beobachtet werden.

Trotz dieses Erfolgs, Newtons Gedankenexperiment zu entkräften, ist damit der Sieg des Relationalismus nicht gesichert. Erstens bleibt der Relationalistin immer noch die Aufgabe, eine vollständige Mechanik mit kompletten Zustandsbeschreibungen und dynamischen Gleichungen zu formulieren, die bloss auf relationale Grössen zurückgreift; solange unsere Mechanik—wie das in der üblichen klassischen Physik der Fall ist—zu ihrer Formulierung sich auch auf absolute Grössen abstützen muss, können sich die Substantialisten immer auf deren Unverzichtbarkeit berufen um ihre Realität zu verteidigen. Falls Raum und Zeit also keine eigenständigen Substanzen sind, sollte eine physikalische Theorie grundsätzlich auch so formulierbar sein, dass keine Referenzen auf Raum und Zeit *qua* solche Substanzen notwendig sind. Es gibt mehrere vollständige relationistische Formulierungen der klassischen Mechanik, wie zum Beispiel diejenigen von Julian Barbour und Bruno Bertotti (1982), Gordon Belot (1999) und Nick Huggett (2006).

Zweitens kompliziert das Auftreten der allgemeinen Relativitätstheorie ab 1915 die Debatte, zunächst für den Relationalismus.⁴ Aus einer relationalistischen Sicht sollte eine wahre physikalische Theorie eine Bedingung erfüllen, die dem was Albert Einstein ‚Machsches Prinzip‘ genannt hat, ähnelt: Raum und Zeit sind durch die raumzeitliche Ordnung aller existierenden physischen Objekte in all ihren Eigenschaften vollständig bestimmt. Einsteins anfängliche Hoffnungen, dass seine allgemeine Relativitätstheorie diesem Prinzip genügt, wurden bald zerschlagen. Es stellt sich nämlich heraus, dass es in der allgemeinen Relativitätstheorie mehrere sogenannte ‚Vakuumlösungen‘ gibt, d.h., Raumzeiten, in denen sich keine Materie oder materieähnliche Substanz findet. Die sogenannten Minkowski- und de Sitter-Raumzeiten sind beides solche—physikalisch ernstgenommene—Vakuumlösungen, und sind also in ihrem Materiegehalt trivialerweise identisch. Trotzdem unterscheiden sie sich in ihrer Raumzeit-Geometrie wesentlich voneinander. Natürlich sind die dynamischen Raumzeiten der allgemeinen Relativitätstheorie weit von den Stipulationen der Newtonschen Konzeption entfernt; trotzdem sieht es also zunächst so aus, als ob die moderne Physik den Substantialismus stützen würde.

Das Blatt hat sich aber in den 1980er Jahren mit der Wiederentdeckung des sogenannten ‚Locharguments‘ von Einstein durch John Stachel, John Earman und John Norton wieder gewendet.⁵ Dabei ist der Leitgedanke, dass die gleich erläuterte ‚Diffeomorphismus-Invarianz‘ der allgemeinen Relativitätstheorie dazu verwendet wird, dem

⁴ Malament 2012 liefert eine hervorragende, wenn auch nicht mühelos zugängliche, Einführung in die allgemeine Relativitätstheorie, die gleichzeitig mathematisch rigoros und philosophisch informiert ist. Um den Umfang dieses Essays nicht zu sprengen, gehe ich nicht weiter auf die spezielle Relativitätstheorie ein; vgl. Brown 2005 für einen wichtigen—und kontroversen—jüngeren Beitrag zu den philosophischen Grundlagen der speziellen Relativitätstheorie.

⁵ Vgl. Norton 2014.

Substantialismus ein Bekenntnis zu numerisch distinkten, aber physikalisch ununterscheidbaren, Raumzeiten anzuhängen. Das bedarf einer etwas ausführlicheren Erklärung. In der allgemeinen Relativitätstheorie besteht eine Raumzeit aus einer Mannigfaltigkeit (im mathematischen Sinn), die mit einer Topologie und Differenzierbarkeitsstruktur ausgestattet ist, und einem darauf überall definierten metrischen Feld, das es erlaubt, raumzeitliche Abstände und Winkel zu messen. Ein Modell der Theorie (oder äquivalent, eine Lösung) besteht aus einer Raumzeit und einer durch den Energie-Impuls-Tensor gegebenen Massen- (und Energie-) dichte. Um ein Modell zu sein, müssen zudem die Metrik und der Energie-Impuls-Tensor die Einsteinschen Feldgleichungen erfüllen, die diese Grössen in Beziehung zueinander setzen. Sowohl die Metrik als auch der Energie-Impuls-Tensor sind (tensorielle) Felder auf der zugrunde liegenden Mannigfaltigkeit. Diese Mannigfaltigkeit dient also gewissermassen als ‚Hintergrund‘ vor dem sich die Physik, also die Wechselwirkung zwischen Geometrie der Raumzeit und der Verteilung der Materie und der Energie, abspielt.

Da in der allgemeinen Relativitätstheorie die Metrik also ‚dynamisch‘ wird, so Earman und Norton (1987), ist sie nicht Teil der Substanz, zu der sich der Substantialismus bekennt. Der Substantialismus wird so also zum ‚Mannigfaltigkeitssubstantialismus‘. Dieser Substantialismus—so die Voraussetzung des Locharguments—muss nicht nur die Mannigfaltigkeit als Substanz annehmen, sondern damit auch die Existenz aller Teile der Mannigfaltigkeit, also ihrer Punkte, unabhängig von den darauf sitzenden physikalischen Feldern, anerkennen. Das bedeutet, so das Argument weiter, dass verschiedene Weisen, diese Felder auf die Hintergrundmannigfaltigkeit zu legen, als numerisch distinkte physikalische Situationen angeschaut werden müssen.⁶ Es ist also gemäss Substantialismus eine Tatsache, ob die Weltlinie eines Planeten durch einen bestimmten Punkt der Mannigfaltigkeit führt oder nicht.

Nun ist es so, dass in der allgemeinen Relativitätstheorie ‚Diffeomorphismen‘ eine dynamische Symmetrie darstellen. Diffeomorphismen sind bijektive, stetig differenzierbare Abbildungen, deren Umkehrabbildung ebenfalls stetig differenzierbar ist. Anschaulich gesagt sind Diffeomorphismen kontinuierliche Abbildungen, die die auf der Mannigfaltigkeit lebenden Felder kontinuierlich—also ohne zu ‚reissen‘—deformieren. Diese Symmetrien sind dynamisch, was bedeutet, dass falls ein Tripel bestehend aus einer Mannigfaltigkeit, einer Metrik und einem Energie-Impuls-Tensor ein Modell der Theorie darstellt, dann stellt dieselbe Mannigfaltigkeit zusammen mit den um den gleichen Diffeomorphismus verschobenen Metrik und Energie-Impuls-Tensor ebenfalls ein Modell dar, wobei eben die Metrik und der Energie-Impuls-Tensor Beispiele von vom Diffeomorphismus herumgeschobenen und deformierten Feldern sind. Der Substantialismus muss nun aber behaupten, dass sich das ‚verschobene‘ Modell vom ersten unterscheidet, da die Felder unterschiedlich auf der Mannigfaltigkeit sitzen.

⁶ Die Felder können zum Beispiel ausserhalb eines kleinen ‚Lochs‘ identisch auf die Mannigfaltigkeit gelegt werden; in diesem Fall unterscheiden sich die Situation nur innerhalb des ‚Lochs‘—daher ‚Lochargument‘.

Diese Implikation ist darum nicht willkommen, weil die beiden Modelle in all ihren beobachtbaren Grössen identisch sind und sich deshalb prinzipiell nicht durch Beobachtung unterscheiden lassen. Zudem ist es so, dass die Bewegungsgesetze der allgemeinen Relativitätstheorie damit indeterministisch würden: unter den dynamischen Gesetzen würde sich so ein beliebiger Anfangszustand in zwei Endzustände entwickeln, die zwar empirisch ununterscheidbar aber physikalisch verschieden wären. Ein solcher Indeterminismus bedeutet aber, dass die Theorie eine unliebsame—weil unphysikalische—,Determinierungsimpotenz' aufweisen würde. Aus diesen Gründen, so das Argument von Earman und Norton, sollte der Mannigfaltigkeitssubstantialismus aus Gründen der ontologischen Redundanz abgelehnt werden.

Um den Rahmen dieses Artikels nicht zu sprengen, will ich nur ganz kurz die wichtigsten Reaktionen zum Lochargument skizzieren.⁷ Eine populäre Gruppe von Antworten insistiert, dass eine Raumzeit nicht durch eine blosse Mannigfaltigkeit repräsentiert werden kann, weil letzterer essentielle Eigenschaften von Raum und Zeit wie Dauer, Distanz und Zeitrichtung fehlen. Eine Raumzeit besteht danach nicht nur aus der Mannigfaltigkeit alleine, sondern zwingend auch aus dem darauf definierten metrischen Feld.⁸ Welches Raumzeitereignis durch einen bestimmten Punkt in der Mannigfaltigkeit repräsentiert wird, hängt so davon ab, wie das metrische Feld auf der Mannigfaltigkeit zu liegen kommt. Da für den ‚raffinierten‘ (engl. ‚sophisticated‘) Substantialismus Punkte der Mannigfaltigkeit zwar die Objekte der Prädikation von raumzeitlichen Eigenschaften und Relationen darstellen, besitzen diese Objekte keine ‚Haecceitas‘, also keine primitive spezifische ‚Diesheit‘, und stellen daher nur zusammen mit der durch das metrische Feld erfolgten Prädikation ein Individuum dar. Der Indeterminismus verschwindet, da die Metrik mit dem Ereignis zusammen transformiert werden muss, damit wir überhaupt von ‚diesem‘ oder ‚jenem‘ Raumzeitereignis reden können.

Eine in ihrem Geiste ähnliche Reaktion nimmt das Fehlen einer Haecceitas der Punkte der Mannigfaltigkeit zum Anlass, überhaupt die fundamentale Existenz von Objekten mit intrinsischen Eigenschaften zu verwerfen. Diese strukturalistische Antwort sieht die Raumzeit in ihrer Gesamtheit als eigenständige Substanz, besteht aber darauf, dass sie eine *relationale Struktur* ist, d.h., dass Raumzeitereignisse nur insofern überhaupt Objekte sind, als sie eine Position oder Rolle vis-à-vis der Gesamtheit der durch raumzeitliche Relationen verbundenen Raumzeitereignissen innehaben. Dieser strukturalistische Realismus ist in letzter Zeit auf verschiedene Bereiche der modernen Physik, insbesondere auch auf die Quantenmechanik, fruchtbar angewendet worden.⁹

⁷ Für eine detailliertere Beschreibung, vgl. Norton 2014 und die Bibliographie darin, sowie Pooley 2013. Einer der wichtigsten Vertreter des ‚raffinierten‘ Substantialismus ist Pooley (im Erscheinen).

⁸ Verschiedene Positionen innerhalb dieser Familie unterscheiden sich unter anderem darin, ob das metrische Feld in die ‚Ontologie‘ oder die ‚Ideologie‘ der Raumzeit einfließt.

⁹ Ladyman und Ross (2007) legen eine kraftvolle Verteidigung des (ontischen) strukturalistischen Realismus vor.

Die allgemeine Relativitätstheorie ist eine klassische Feldtheorie, d.h. sie beschreibt räumlich ausgedehnte und zum Beispiel durch die Metrik oder den Energie-Impuls-Tensor dargestellte Felder, die sich mittels einer klassischen, also nicht-quantentheoretischen, Dynamik entwickeln. Als solche kann sie die Quanteneffekte, die zum Beispiel in den sehr starken Gravitationsfeldern des ganz frühen Universums und in der Nähe von schwarzen Löchern relevant werden, nicht beschreiben. Sie kann deshalb die Gravitationsphysik in unserer Welt im besten Fall bloss annähern und wird letztlich durch eine Quantentheorie der Gravitation ersetzt werden müssen; durch eine Theorie also, die starke Gravitationsfelder mit den dabei auftretenden Quanteneffekten korrekt erfasst. Leider gibt es momentan eine solche vollständige Theorie noch nicht, sondern nur sehr unterschiedliche—und sehr unterschiedlich weit ausgereifte—Ansätze, eine solche zu formulieren. Nicht nur herrscht überhaupt kein Konsens darüber, was die theoretisch vielversprechendsten Ansätze sind, sondern es gibt auch keine Beobachtungen oder experimentelle Daten, die uns eine empirische Anleitung zur Formulierung einer solchen Theorie geben könnten. Es bleibt uns also nichts anderes übrig, als bestehende Forschungsprogramme theoretisch zu beurteilen und an ihren eigenen Ansprüchen zu messen, und dabei nicht vergessen, dass alle Konklusionen nur sehr vorläufig sein können.

Trotz dieser Vielfalt zeigt sich allgemein, dass in der Quantengravitation Raum und Zeit wahrscheinlich nicht mehr wie bis anhin Teil der fundamentalen Ontologie sind, sondern zu emergenten Entitäten werden.¹⁰ In Analogie zu Tischen und Stühlen, die zwar existieren, aber sicher nicht Teil der Ontologie einer fundamentalen physikalischen Theorie sind, wird dadurch nicht die *Existenz*, sondern bloss die *Fundamentalität* der Raumzeit in Frage gestellt. Genauso wie Tische und Stühle aus den letztlich elementaren Bausteinen der Materie aufgebaut sind und aus bestimmten Kombinationen von bestimmten elementaren Objekten erwachsen und über emergente Eigenschaften wie zum Beispiel ihre Festigkeit verfügen, sollte man die Raumzeit hier als Struktur verstehen, die erst durch eine günstige Kombination von elementaren Objekten entsteht und deren Eigenschaften wie zum Beispiel Dauer, Distanz und Zeitrichtung zu einem grossen Teil emergent sind. Raum und Zeit werden so zu ‚emergenten‘ Phänomenen, die aus der grundlegenden Physik erwachsen. In der Sprache der Physik sind Raumzeittheorien wie die allgemeine Relativitätstheorie ‚effektive‘ Theorien und die Raumzeit selber ‚emergent‘, ähnlich wie Thermodynamik eine effektive Theorie ist und Temperatur emergent ist, da sie sich aus dem kollektiven Verhalten der Gasmoleküle herausbildet. ‚Emergenz‘ ist dabei Platzhalter der näher zu verstehenden Relation und soll zunächst einfach ausdrücken, dass auf der Makroebene etwas Neuartiges auftritt, das so auf der Mikroebene nicht vorhanden ist.

Obwohl die Art und Weise, und auch die Radikalität mit welcher Raum und Zeit in der Quantengravitation nicht mehr fundamental existieren, von Ansatz zu Ansatz verschieden sind, drängt sich so eine philosophische Auseinandersetzung mit einer fundamental nicht raumzeitlichen Welt auf. Die Idee, dass das Universum und sein materieller Gehalt

¹⁰ Vgl. Huggett und Wüthrich 2013. Das beschriebene Problem ist Hauptthema der im Erscheinen begriffenen Monographie von Huggett und Wüthrich.

letztlich nicht in Raum und Zeit sind, erschüttert unsere Konzeption der materiellen Welt und von physischer Existenz überhaupt so profoundly wie keine Revolution zuvor. Eines der Hauptprobleme einer physikalischen Theorie, die die fundamentale Existenz von Raum und Zeit ablehnt, stellt zum Beispiel die Sicherstellung ihrer empirischen Kohärenz dar. Mit Jeffrey Barrett (1999, §4.5.2) bezeichnen wir eine Theorie als *empirisch inkohärent* dann wenn die Wahrheit der Theorie die Rechtfertigung, die wir dafür haben, sie als wahr zu akzeptieren, unterminiert. Nach dieser Definition scheint eine Theorie, die die fundamentale Existenz der Raumzeit leugnet, empirisch inkohärent zu sein, weil die empirische Rechtfertigung einer Theorie letztlich nur auf beobachtbaren Effekten eines in Raum und Zeit situierten ‚Etwas‘ beruhen kann, wie zum Beispiel das Leuchten der dritten Diode von links um Mitternacht oder die raumzeitliche Koinzidenz des Zeigers mit einer Zahl auf der angezeigten Skala. Wenn nun aber eine solche Theorie wahr ist, dann kann es keine so situierten Objekte geben—zumindest nicht auf der fundamentalen Ebene.¹¹

Neben der Frage der Emergenz der Raumzeit selber muss mit der fundamentalen Nicht-Existenz von Raum und Zeit auch die aristotelische Konzeption der Materie als *in der Raumzeit existierend* neu gedacht werden. Falls letztlich Materie nicht in Raum und Zeit existiert, dann kann die Raumzeitlichkeit auch nicht ohne Weiteres als Abgrenzungsmerkmal des Physischen vom Mentalen oder Abstrakten verwendet werden.

Es scheint zwei grundsätzliche Möglichkeiten zu geben, Materie in die fundamentale Struktur der Quantengravitation einzubinden, und damit vielleicht wieder ein Abgrenzungsmerkmal zu gewinnen. Entweder ist Materie trotz der Emergenz der Raumzeit Teil der fundamentalen Struktur und also letztlich nicht raumzeitlich; oder Materie emergiert, genauso wie die Raumzeit, von der fundamentalen, nicht-raumzeitlichen, nicht-materiellen Struktur. Diese Optionen sollen hier nicht weiter verfolgt werden; es sollte jedoch klar sein, dass erstere eine Überwindung der altherwürdigen aristotelischen Konzeption von Materie bedingt, und dass letztere die grosse Frage nach der Natur dieser fundamentalen Struktur zurücklässt. Damit sind wir so oder so philosophisch gefordert.

3 Ontologische Aspekte: Materie

3.1 Das Messproblem und die Interpretation der Quantenmechanik

Damit kommen wir zur Besprechung der Ontologie der Materie in der zeitgenössischen Philosophie der Physik. Unsere beste Theorie der letzten Bestandteile der Materie ist das sogenannte ‚Standardmodell der Elementarteilchenphysik‘, eine atomistisch verstandene Quantentheorie des Materiegehalts des Universums.¹² Während in der klassischen

¹¹ Vgl. wiederum Huggett und Wüthrich 2013 für eine detailliertere Darstellung des Problems des empirischen Kohärenz und seiner Lösung.

¹² Da momentan darüber noch sehr wenig gesagt werden kann, lasse ich Dunkle Materie und Dunkle Energie ausser Betracht. Der Leser oder die Leserin sollte daraus nicht den falschen Schluss ziehen, dass diese irrelevant sind, denn möglicherweise wird ein

Mechanik die Interpretation der dabei auftretenden ‚punktförmigen‘ Teilchen im Vakuum oder der ausgedehnten starren Körper oder Flüssigkeiten oder Gase vergleichsweise unproblematisch ist, stellen uns Quantentheorien vor riesige interpretative Herausforderungen.¹³ Dieser Abschnitt befasst sich mit einigen der wichtigsten dieser Schwierigkeiten, ohne dabei Anspruch auf Vollständigkeit zu erheben.

Zunächst könnte man meinen, dass zumindest die nicht-relativistischen Quantentheorien (‚Quantenmechanik‘) ontologisch gesehen nahezu klassische Theorien von atomistischen, also nicht weiter zerlegbaren, elementaren Systemen—von ‚Teilchen‘—seien und dass sich deren radikale Neuerungen auf die *Zustände* und damit auf die *Eigenschaften* dieser Teilchen beschränke. Die Wahrheit ist allerdings wesentlich komplizierter, wie wir schrittweise sehen werden.

Am Anfang steht das Messproblem.¹⁴ Dieses berüchtigte Problem folgt direkt aus grundlegenden Annahmen der Quantenmechanik. In der mathematischen Formulierung der Theorie stellt die sogenannte ‚Wellenfunktion‘ den Zustand des beschriebenen Quantensystems dar. Die Zustände von Quantensystemen werden allgemeiner als Vektoren in Vektorräumen dargestellt. Dass Vektorräume dazu besonders geeignet sind hat mit dem Superpositionsprinzip zu tun:

Superposition. Falls A und B beides zulässige Zustände eines Quantensystems sind, dann ist $\alpha A + \beta B$ ebenfalls ein zulässiger Zustand des Systems, wobei α und β beliebige komplexe Zahlen sind (deren Normquadrate sich zu 1 summieren).

Dieses Prinzip gilt für alle Zustände und deshalb zum Beispiel auch für den Ortszustand des Systems. Daran erkennt man sofort, dass in der klassischen Physik das Prinzip nicht gültig ist: obwohl ein System an zwei verschiedenen Positionen sein kann, kann es zu jedem Zeitpunkt bloss in *einer* Position lokalisiert sein—im Gegensatz zur Quantenmechanik, wonach das System sich in einem Superpositionszustand der beiden

besseres Verständnis des ‚Dunklen Gehalts‘ unseres Universums zu einer radikalen Umschift des Folgenden führen.

¹³ ‚Vergleichsweise‘ sollte hier nicht überlesen werden, da es falsch wäre anzunehmen, dass die klassische Physik frei von Schwierigkeiten ist. Punktteilchen sind Idealisierungen, die zu diversen Arten von dynamischen Singularitäten führen, von denen nicht von vornherein klar ist, dass sie auf die Idealisierung zurückzuführen sind; die Grundannahmen der Undurchdringlichkeit und der Wechselwirkung durch Kontakt der Kontinuumsmechanik führen zu Paradoxien (Smith 2007), ebenso wie die Anwendung der Newtonschen Gravitationstheorie auf die Kosmologie (Norton 1999).

¹⁴ Albert 1992 liefert eine nachvollziehbare Einführung in das Messproblem der Quantenmechanik und verschiedene der wichtigsten dazu vorgeschlagenen Lösungen. Meine Präsentation des Messproblems folgt teilweise der besonders scharfen Darstellung in Maudlin 1995. Für eine ausführlichere Darstellung, vgl. Wüthrich (in Erscheinung). Die kürzlich erschienene Sammlung von Friebe et al. (2015) bietet eine hervorragende deutschsprachige Einführung in die wichtigsten Themen in der Philosophie der Quantenphysik.

Positionen befinden kann. In dieser Situation kann man nicht mehr sagen, dass sich das System in irgendeiner bestimmten Position befindet.

Die Dynamik eines Quantensystems wird dabei als durch die Schrödingergleichung beschrieben angenommen. Die genaue Form der Schrödingergleichung spielt für unsere Zwecke keine Rolle, sondern nur zwei ihrer allgemeinen Eigenschaften. Erstens ist die Gleichung *deterministisch*, d.h., für einen gegebenen Anfangszustand eines physikalischen Systems und alle Kräfte, die darauf wirken, bestimmt die Schrödingergleichung eindeutig den Zustand des Systems zu allen Zeiten.¹⁵ Zweitens ist die Gleichung linear: falls die Gleichung ein System, das sich zur Zeit t im Zustand A befindet, so entwickelt, dass es sich zur Zeit t' im Zustand A' befindet und das gleiche System, das sich zur Zeit t im Zustand B befindet, in den Zustand B' zur Zeit t' entwickelt, dann entwickelt die Gleichung das System im Zustand $\alpha A + \beta B$ zur Zeit t in den Zustand $\alpha A' + \beta B'$ zur Zeit t' . Die Linearität der Schrödingergleichung garantiert also, dass sich ein Superpositionszustand nur in einen Superpositionszustand entwickeln kann. Einmal in Superposition, immer in Superposition.

Die Kombination dieser Grundannahmen führt nun ziemlich direkt zum Messproblem. Ohne auf die Details einzugehen—diese findet man in den Referenzen—soll hier festgehalten werden, dass es in der Quantenmechanik zum Messproblem kommt, da wir den Zustand eines Systems *nie* in einer Superposition finden, wenn wir ihn messen. Zum Beispiel beobachten oder messen wir ein System immer an einem bestimmten Ort (vorausgesetzt, dass wir dessen Ort messen können), und nie in einer Superposition von zwei verschiedenen Orten. Oder wenn wir den ‚Spin‘ eines Quantensystems in einer bestimmten Richtung messen, dann finden wir, mit gewissen statistischen Wahrscheinlichkeiten, immer eines von zwei möglichen Messresultaten (‚+‘ oder ‚parallel‘ und ‚-‘ oder ‚antiparallel‘), und niemals eine Superposition der beiden, obwohl das System unmittelbar vor der Messung oft in einem solchen Zustand ist. Quantenmechanische Systeme sind im allgemeinen in Superpositionszuständen, womit wir das Messproblem haben. Hier in einer freien Übersetzung von Tim Maudlins präziser Formulierung:

Die folgenden drei Aussagen sind gegenseitig inkonsistent:

- (A) Die Wellenfunktion eines Systems ist komplett, d.h. die Wellenfunktion spezifiziert (direkt oder indirekt) alle physikalischen Eigenschaften eines Systems.
- (B) Die Wellenfunktion entwickelt sich immer nach einer dynamischen linearen Gleichung (wie beispielsweise der Schrödingergleichung).
- (C) Messungen haben immer (oder wenigstens meistens) bestimmte Ergebnisse, d.h. am Ende einer Messung des Spins eines Elektrons ist der Messapparat in einem Zustand der ‚+‘ (und nicht ‚-‘) oder ‚-‘ (und nicht ‚+‘) anzeigt. (1995, 7)

¹⁵ Wüthrich 2011, §2-3, diskutiert die vielschichtige Frage, ob die Quantenmechanik deterministisch oder indeterministisch ist, inklusive des kürzlich publizierten ‚Theorems des freien Willens‘ von John Conway und Simon Kochen, das einige Wellen geworfen hat.

Da (A), (B) und (C) gegenseitig inkonsistent sind, muss mindestens eine dieser Aussagen verworfen werden. Das stellt aber eben gerade das Problem dar: zwei der drei Aussagen ((A) und (B)) entsprechen nahezu Grundprinzipien der Quantenmechanik—einer enorm erfolgreichen Theorie, deren Erfolg uns ja gerade dazu motivierte, die Theorie zu verstehen—and Aussage (C) scheint eine unkontroverse Annahme bezüglich unserer experimentellen Praxis zu sein. Das bedeutet, dass keine der Aussagen fallengelassen werden kann, ohne entweder die Theorie selber zu ändern, oder aber unsere bis anhin unproblematischen Annahmen darüber, in welcher Beziehung die Theorie zu unserer Beobachtungswelt steht.

Eine naheliegende Auflösung des Messproblems liegt darin, dass ganz grundsätzlich abgestritten wird, dass die Theorie direkt Aspekte der Welt repräsentiert. Mit andern Worten, eine realistische Interpretation der Theorie wird abgelehnt. In diese Gruppe fallen zum Beispiel instrumentalistische ‚Interpretationen‘, die davon ausgehen, dass grundsätzlich zumindest nicht alle (oder radikaler: keine) der Propositionen der Theorie wahrheitswertfähig sind im Sinn, dass sie Fakten in der Welt repräsentieren, oder dass ihre Terme Entitäten in der Welt bezeichnen. Obwohl die Details und auch die instrumentalistische Prägung stark variieren, gehören zum Beispiel die übliche Kopenhagener Deutung wie sie von Niels Bohr, Werner Heisenberg, Wolfgang Pauli und John von Neumann vertreten wurde dazu. Ebenso sind auch ‚epistemische‘ Interpretationen wonach Quantenzustände nicht tatsächliche Zustände von Systemen darstellen, sondern bloss das Wissen eines mit dem System konfrontierten epistemischen Agenten, vergleichbare ‚informationstheoretische‘ Interpretationen wie der Quanten-Bayesianismus dazuzuzählen. Schliesslich sind pragmatistische Interpretationen wie beispielsweise diejenige Richard Healeys (2015) auch von dieser Art. Vertreter dieses Lagers verneinen, dass Quantentheorien neue ontologische Lektionen erteilen.

Ontologische Implikationen scheinen aber bei den in der Philosophie der Physik populäreren realistischen Varianten nicht vermeidbar zu sein. Wenn wir also die Quantenmechanik als annähernd wahr und ihre theoretische Terme als zumindest ungefähr referierend annehmen—and der enorme Erfolg von Quantentheorien gibt uns eine gute Legitimation dafür—, dann muss das Problem direkt angegangen werden und mindestens eine der Aussagen (A) - (C) verworfen werden.

Je nachdem, welche der Aussagen fallengelassen wird, können nun realistische Interpretationen grob in drei Kategorien unterteilt werden. Verborgene-Variablen-Theorien wie zum Beispiel die bohmsche Mechanik (Bohm 1952) lehnen (A) ab und erweitern die Quantenmechanik um zusätzliche Freiheitsgrade und dynamische Gleichungen, die deren Entwicklung beschreiben (sowie deren Wechselwirkung mit der Wellenfunktion). Diese zusätzlichen Freiheitsgrade werden als Teilchen mit ihren Positionen im dreidimensionalen Raum interpretiert. Der gesamte Zustand eines Systems ist dann erst durch die Kombination von Wellenfunktion und Teilchenposition gegeben. Da diese zusätzlichen Freiheitsgrade, d.h. die Positionen der elementaren Teilchen, im allgemeinen nicht direkt beobachtbar sind, muss die Evidenz für Verborgene-Variablen-Theorien indirekt sein. Obwohl in der bohmschen Mechanik die Ontologie völlig klassisch scheint—Punktteilchen mit wohldefinierten Trajektorien, die deterministischen

Bewegungsgesetzen folgen—, trägt dieser Schein. Zum einen verletzt die Theorie die intuitive Annahme der ‚Nicht-Kontextualität‘, wonach „die Messung einer Observablen das gleiche Resultat liefern muss unabhängig davon, welche anderen Messungen zeitgleich gemacht werden mögen“ (Bell 1987, 9, meine Übersetzung). Diese Kontextualität der Theorie ist allerdings insofern kein Problem, als dass bloss Teilchenpositionen als fundamental angesehen werden und alle andern Observablen bloss instrumentalistisch betrachtet werden. Zum andern ist die Theorie wie von John Bells Theorem gefordert nicht-lokal. Da Bells Theorem allerdings unabhängig der Interpretation gilt, sind alle Quantentheorien nicht-lokal; diese Nicht-Lokalität lässt sich in einer adäquaten Theorie schlicht nicht vermeiden. Zum letzten kann die Frage nach dem ontologischen Status der Wellenfunktion nicht vermieden werden. Wir kommen weiter unten noch auf die beiden letzten Punkte zurück.

Die zweite Option ist die Verneinung von (B). Diese sogenannten ‚Kollapstheorien‘ modifizieren die Dynamik der Theorie, typischerweise hin zu einem insgesamt indeterministischen und—damit ja das Messproblem gelöst wird—nicht-linearen dynamischen Regime. Das geschieht entweder häppchenweise während ‚Messepisoden‘ (wie in der letztlich unvollständigen Kopenhagener Deutung, wenn sie denn realistisch verstanden wird) oder universell wie in der stochastischen Theorie von Giancarlo Ghirardi, Alberto Rimini und Tullio Weber (‚GRW‘, 1986), die die Schrödingerdynamik um stochastische Kollapse erweitert. Die GRW-Theorie interpretiert deshalb streng gesehen nicht die vorhandene Quantenmechanik, sondern modifiziert sie zu einer neuen Theorie. Sie führt dabei zwei neue Konstanten ein. Wegen des sogenannten ‚Schwanzproblems‘ (von Schrödingers Katze) wurde angezweifelt, ob sie tatsächlich das Messproblem gänzlich löst.¹⁶ Die Ontologie von GRW bleibt in der ursprünglichen Theorie von 1986 vollkommen un spezifiziert. Die beiden beliebtesten Varianten sind ‚GRWm‘ und ‚GRWf‘. In GRWm determiniert die Wellenfunktion ein physikalisches Feld in der vierdimensionalen Raumzeit, das als kontinuierliche Verteilung der Massendichte interpretiert wird. In GRWf wird dieses kontinuierliche Feld durch punktförmige Ereignisse in der vierdimensionalen Raumzeit (‚flashes‘) ersetzt. Damit haben wir in GRWf weder Teilchen, die Weltlinien folgen, wie in der klassischen Physik oder in der bohmschen Mechanik, noch Felder wie in GRWm oder in den Quantenfeldtheorien der modernen Physik, sondern bloss endlich viele diskrete Ereignisse in jeder begrenzten Region der Raumzeit.

Als letzte Möglichkeit kann (C) verworfen werden. Gemäss den auf Hugh Everett (1957) zurückgehenden ‚Viele-Welten-Interpretationen‘ ist das eindeutige und ausschliessliche Auftreten von bestimmten Messresultaten bloss eine Illusion; in Wahrheit wird durch eine Messung eine Superposition nicht ‚kollabiert‘, sondern bleibt weiter bestehen.¹⁷ Da die ganze Welt quantenmechanisch ist und nicht—wie etwa in der Kopenhagener

¹⁶ Warum der Schwanz von Schrödingers Katze nicht ganz verschwindet und warum das ein Problem ist, liest man am besten bei Ghirardi (2011, §12) nach.

¹⁷ Für eine autoritative Übersicht über alle wichtigen Aspekte der Interpretationen in diesem Lager ist die Sammlung von Saunders et al. (2010) empfohlen, und dabei insbesondere der einführende Artikel von Saunders.

Deutung postuliert—in eine Mikro- und eine Makrowelt partitioniert wird, verschränkt sich der Quantenzustand des Beobachters mit demjenigen des bereits verschränkten kombinierten Systems bestehend aus dem ursprünglich zu messenden Quantensystem und dem Messapparat. Durch diesen Prozess entstehen zwei ‚Welten‘—je eine pro mögliches Messresultat—bestehend aus dem Tripel Quantensystem-Messapparat-Beobachter, wobei der Zustand des Quantensystems in jeder ‚Welt‘ konsistent ist mit denjenigen des Messapparats und des Beobachters. Die Theorie ist damit ontologisch äusserst verschwenderisch, postuliert sie doch eine letztlich nicht abzählbar unendliche Menge von ‚Welten‘.

Da Viele-Welten-Theorien deterministisch sind—die Schrödingergleichung bestimmt die Dynamik vollständig—, ist ihre grösste Herausforderung, eine physikalisch motivierte und metaphysisch annehmbare Darstellung zu geben, wie die Wahrscheinlichkeiten in die Quantenmechanik kommen und wie wir durch die Statistik unserer Messresultate die Theorie glaubhaft bestätigen können.¹⁸ Dies ist nicht trivial, da gemäss diesen Theorien immer *alle* möglichen Ergebnisse auch tatsächlich sind und es gewisse ‚Welten‘ gibt, in denen die Experimentatorin immer nur parallel ausgerichtete Spins misst. Diese Forscherin wird kaum Grund haben zu glauben, dass die Quantenmechanik eine zumindest annähernd wahre Theorie ist; mit andern Worten, wie kann die empirische Kohärenz der Theorie etabliert werden?

Je nach Lösung des Messproblems wird die Ontologie der Quantenmechanik, d.h. der Menge der ‚Objekte‘, die die Theorie postuliert, anders aussehen. Man könnte nun versucht sein, eine ontologisch gesehen konservative Interpretation zu wählen und sich dann auf den Standpunkt zu stellen, dass die Quantenrevolution in unserer Ontologie der Welt keine grosse Revolution ausgelöst hat—im Gegensatz natürlich zur ‚Ideologie‘, d.h. zur Menge der Eigenschaften und Relationen, die den Dingen in der Welt oder der Welt insgesamt zugeschrieben werden. Abgesehen von den bekannten philosophischen Problemen, die man sich mit einer metaphysisch harten Unterscheidung zwischen Ontologie und Ideologie einhandelt (und auf die hier nicht eingegangen werden soll), ist diese Antwort aus zwei Gründen unbefriedigend.

Erstens muss die Quantenmechanik (zunächst) mit der speziellen Relativitätstheorie in Einklang gebracht werden, was eine Modifizierung der Theorie mit sich bringt. Die Quantenmechanik der Teilchen wird so zu einer Quantenfeldtheorie, und die dabei ontologisch hinter die Felder zurückgestuften Teilchen werden zu Feldquanten, also Aspekten der relevanten Felder, degradiert. Dass Teilchen nicht mehr fundamental zur Ontologie gehören zeigt sich insbesondere in Tatsachen wie zum Beispiel dass die ‚Anzahl Teilchen‘ eine im Prinzip messbare Eigenschaft von Feldern ist und dass diese Felder in Superpositionszuständen von verschiedenen Anzahlen von Teilchen sein können. Ist das der Fall, dann ist die vorhandene Anzahl Teilchen indeterminiert. Angesichts solcher Möglichkeiten scheint es unangebracht, die klassische Vorstellung

¹⁸ Die Aufsätze von Saunders, Wallace, Greaves und Myrvold, Kent, Albert und Price in Saunders et al. 2010 ergeben zusammen ein hervorragendes Bild des Problems der Wahrscheinlichkeiten und der Lösungsansätze dazu.

von Teilchen als fundamentale Konstituenten der Ontologie einer relativistischen Quantenfeldtheorie zu betrachten.¹⁹

Zweitens ist es auch schon in der nicht-relativistischen Quantenmechanik der Fall, dass die Ontologie von den üblichen klassischen Teilchen abweicht, um das Messproblem zu lösen. Diese Abweichung ist vielleicht nicht zwingend, aber bei allen Hauptvertretern der drei Lösungsansätze zumindest scheinbar der Fall. In den Viele-Welten-Theorien sind wir zumindest in der traditionellen Auffassung mit einer ausufernden Menge von ‚Welten‘ konfrontiert. Das ist allerdings bei der gegenwärtig häufig rezipierten Version von David Wallace (2012) nicht der Fall: das Universum umfasst bloss eine Unmenge von nur sehr schwach wechselwirkenden Teilsystemen, aber es handelt sich dabei nicht wörtlich um viele verschiedene Welten. Unter diesem Gesichtspunkt wäre die neutralere Bezeichnung ‚Everett Interpretation‘ dem irreführenden ‚Viele-Welten-Theorien‘ vorzuziehen. Im Fall der GRW-Theorie haben wir entweder ein alles durchdringendes aber nicht in natürliche Untereinheiten geteiltes Dichtefeld oder aber bloss Galaxien von punktförmigen ‚Blitzen‘. In der bohmschen Mechanik schliesslich müssen wir neben den elementaren Teilchen möglicherweise auch noch der Wellenfunktion in der Ontologie Platz machen—davon gleich mehr—, da im allgemeinen der Gesamtzustand eines Systems mit verschränkten Freiheitsgraden nicht über den Zuständen der Einzelteile des Systems superveniert.²⁰

In diesem ontologischen Zusammenhang wurde in letzter Zeit gerade von Seiten der Bohmianer die Forderung laut, dass eine quantenmechanische Theorie mit einer ‚primitiven Ontologie‘ ausgestattet sein muss, damit sie überhaupt minimalen Grundanforderungen genügt. Diese Forderung ist primär gegen Autoren gerichtet, die damit liebäugeln, die Wellenfunktion, die im Konfigurationsraum ‚lebt‘ und nicht in der vierdimensionalen Raumzeit, als fundamentaler als der ‚materielle‘ Gehalt des Universums anzunehmen.²¹ Unter einer ‚primitiven Ontologie‘ wird eine Sammlung von Objekten (‚local beables‘, in Bells einprägsamem Ausdruck), die zur Erklärung der Quantenphänomenologie individuell notwendig und gemeinsam hinreichend sind, verstanden. Diese ‚local beables‘ sind die gemäss der Theorie fundamentalen Elemente der Realität. Was sie sonst auch immer sein mögen—es ist eben gerade Aufgabe einer Theorie, das zu spezifizieren—, sind es doch Objekte *in der Raumzeit*.²² Falls sich also

¹⁹ Dies ist zumindest die orthodoxe Lehrmeinung (vgl. Malament 1996); dagegen argumentiert hat zum Beispiel Bain (2011). Es muss allerdings beachtet werden, dass die meisten Quantenfeldtheorien nicht auf einer soliden mathematischen Grundlage formuliert sind; entsprechend sind Interpretationen ihrer Ontologie mit Vorsicht zu geniessen. Der Beitrag von Kuhlmann und Stöckler in Friebe et al. 2015 dient als idealer deutschsprachiger Einstiegspunkt in die Philosophie der Quantenfeldtheorie.

²⁰ Die Frage nach dem ontologischen Status der Wellenfunktion muss von jeder Interpretation beantwortet werden. Die in Ney und Albert 2013 gesammelten Essays geben einen guten Einstieg in die aktuelle Forschung.

²¹ Wie zum Beispiel Albert (1996).

²² Vgl. Ney und Phillips 2014, die eine sorgfältige Wertung der bestehenden Literatur zu diesem Thema liefern.

die Nicht-Fundamentalität der Raumzeit bestätigen sollte, dann muss entweder das Konzept einer ‚local beable‘ reformiert werden, so dass wir auch auf einer nicht-raumzeitlichen fundamentalen Stufe eine durch ‚beables‘ bevölkerte Ontologie haben können, oder die geforderte primitive Ontologie ist bloss auf einer raumzeitlichen, aber daher emergenten, Ebene integrierbar.

Gerade weil die bohmsche Mechanik durch ein klassisches Weltbild motiviert wird—obwohl das von den Bohmianern selber dezidiert betritten wird—, haben einige Bohmianer (z.B. Esfeld et al. 2014) argumentiert, dass die Wellenfunktion nicht als Teil der Ontologie der Theorie verstanden werden sollte, sondern als wesentlicher Bestandteil ihrer *nomologischen Struktur*. Die Wellenfunktion ist deshalb gemäss diesem Ansatz mehr Naturgesetz denn physikalisches Objekt. Die Wellenfunktion ist kein physisches Objekt, dessen Dynamik durch ein Naturgesetz—die Schrödingergleichung—regiert wird; vielmehr ist die Wellenfunktion *selber* ein Naturgesetz (das eventuell einem allgemeinerem Naturgesetz unterliegt). Dabei scheint gerade ein ‚Humesches‘ Verständnis von Naturgesetzen attraktiv, weil da die Naturgesetze bloss auf den kategorischen Tatsachen supervenieren und deshalb nicht dem ontologischen ‚Erdgeschoss‘ hinzugefügt werden muss.²³ Damit bleibt die Ontologie sehr klassisch—elementare Teilchen mit definiten Positionen im drei-dimensionalen Raum. Das sollte allerdings nicht darüber hinwegtäuschen, dass auch die bohmsche Mechanik in wesentlichen Punkten von klassischen Theorien abweichen muss um die Quantenphänomene zu beschreiben. Zum einen unterscheiden sich doch die Naturgesetze (die die Wellenfunktion beinhalten) von den klassischen. Wie schon oben erwähnt ist die Theorie zudem kontextuell und nicht-lokal.

3.2 Quantenmechanische Nicht-Lokalität

Die Nicht-Lokalität tritt allerdings nicht nur in Verborgene-Variablen-Theorien auf, wie manchmal behauptet wird, sondern ist ganz allgemeiner Natur und muss von jeder Theorie respektiert werden. Das ist das, was Bells Theorem und seine experimentelle Bestätigung etablieren. Bells Theorem besagt, dass jede Theorie, die gewisse intuitive Annahmen macht, eine Ungleichung impliziert, die sowohl in der Quantenmechanik wie auch in Experimenten nachweislich verletzt ist (Bell 1964). Zu den intuitiven Annahmen, die gemacht werden müssen, zählen insbesondere gewisse—scheinbar unproblematische—Lokalitätsthesen. Da die Verletzung der Ungleichung auch experimentell bestätigt ist, steht Bells Theorem und die damit bewiesene Nicht-Lokalität sogar unabhängig von der Wahrheit der Quantentheorie.

Die wesentliche Idee hinter Bells monumentalem Resultat kann einfach erläutert werden.²⁴ Die angenommene Versuchsanordnung geht von einer zentralen Quelle aus, die paarweise Teilchen mit verschränkten Freiheitsgraden (z.B. Elektronenspin in eine bestimmte Richtung, Photonenpolarisation in eine bestimmte Richtung) produziert und je eines davon in den linken und rechten Zweig sendet. Jeder der beiden Zweige enthält

²³ Vgl. Esfeld 2014, Miller 2014, Callender 2015.

²⁴ Ich folge hier Mermin 1985.

einen Detektor (,A' und ,B'), bei dem in drei verschiedenen Richtungen gemessen werden kann. Die Einstellungen der drei Richtungen (,1', ,2' und ,3') wird in jedem Zweig frei und rein zufällig gewählt, so dass die Experimentatorin im jeweils andern Zweig die Messeinstellung nicht besser antizipieren kann als durch reines Erraten. Der Detektor hat eine Diode, die entweder rot (,R') oder grün (,G') aufleuchtet und damit eines von zwei möglichen Messresultaten anzeigt. Ausser den Teilchen, die von der Quelle nach A und B fliegen, gibt es zwischen den drei Teilen der Versuchsanordnung keinen Kontakt und es werden keinerlei Signale gesandt.

Nun werden viele Durchgänge durchgeführt, die jeweils daraus bestehen, dass an der Quelle ein verschränktes Paar erzeugt wird, dessen Teile anschliessend in die beiden gegenüberliegenden Zweige geschickt und dort gemessen werden. Die Daten jedes Durchgangs (11GG, 23GR, etc.) werden gesammelt und anschliessend ausgewertet. Es zeigt sich (in der Quantenmechanik, oder im tatsächlich durchgeführten Experiment), dass diese Daten folgende zwei Eigenschaften aufweisen:

- (1) Für alle Durchgänge, für die die Einstellungen in A und B dieselben waren, leuchten die beiden Dioden in A und B jeweils in der gleichen Farbe, sind also *perfekt korreliert*.
- (2) Über alle Durchgänge insgesamt gesehen (unabhängig von den gewählten Einstellungen) finden sich keine Regelmässigkeiten und *keine Korrelationen*; insbesondere finden wir in der Hälfte der Fälle, dass beide Dioden in der gleichen Farbe aufleuchten, und in der andern Hälfte der Fälle, dass die beiden Dioden in verschiedenen Farben leuchten.

Die Herausforderung besteht nun darin, eine Theorie zu finden, die *beide* Merkmale der gesammelten Datensätze erklären kann. Bloss die perfekte Korrelation (1) zu erklären, wäre trivial: die Detektoren könnten vorher so programmiert worden sein, dass sie immer nur grün leuchten, was aber (2) verletzen würde; oder die Detektoren könnten zufällig rot oder grün leuchten und damit (2) erklären, was wiederum aber im Widerspruch zu (1) stehen würde. Eine natürliche Annahme zur Erklärung einer Korrelation wie in (1) ist die Existenz einer gemeinsamen Ursache. Zum Beispiel könnten die Teilchen in jedem Durchgang an der Quelle ein geordnetes Tripel von ,Anweisungen' erhalten, die dem Detektor für die drei möglichen Einstellungen jeweils mitteilen, in welcher Farbe er aufzuleuchten hat. Ein solches Tripel bestünde aus drei Bits an Information, z.B. RRG, GRG, etc, bei insgesamt $2^3 = 8$ Möglichkeiten. Damit kann (1) einfach erklärt werden: beiden Teilchen wird das identische Tripel mitgegeben.

Leider ist keine solche Erklärung, die auf gemeinsamen Ursachen fusst, auch mit (2) konsistent! Um das zu sehen, nehme man sich ein mögliches Tripel an Anweisungen vor, z.B. RRG. In diesem Fall leuchten die Detektoren für die fünf Einstellungen 11, 22, 33, 12 und 21 in der gleichen Farbe, und für die andern vier von insgesamt 3^2 Einstellungen 13, 31, 23 und 32 in verschiedenen Farben. Da die Einstellungen zufällig und unabhängig ausgewählt werden, ist jede dieser neun Kombinationen gleich wahrscheinlich. Das bedeutet aber, dass für das Tripel RRG die Detektoren in 5/9 aller Fälle in der gleichen Farbe aufleuchten werden. Das gleiche gilt offensichtlich auch für RGR, GRR, GGR,

GRG und RGG. Damit verbleiben aber nur noch zwei Tripel: RRR und GGG. In diesen beiden Fällen ist es allerdings so, dass die Detektoren mit Wahrscheinlichkeit 1 in der gleichen Farbe aufleuchten. Zusammengenommen kann Folgendes festgehalten werden: falls es lokale (im Teilchen eingeprägte) Anweisungen gibt, dann werden in mindestens $5/9$ aller Durchgänge die Detektoren in der gleichen Farbe aufleuchten, und zwar unabhängig davon, wie oft an der Quelle die verschiedenen Anweisungstripel ausgewählt werden. Damit haben wir im Wesentlichen Bells berühmte Ungleichung: die Wahrscheinlichkeit, dass die Detektoren in der gleichen Farbe aufleuchten ist grösser oder gleich $5/9$.

Damit ist auch offensichtlich, dass (2) damit verletzt ist; mit andern Worten: (2) verletzt Bells Ungleichung! Die Konjunktion von (1) und (2) kann also von keinem lokalen Modell erklärt werden. Wenn wir damit nicht den Erklärungsversuch der perfekten Korrelation (1) aufgeben, müssen wir also eine nicht-lokale, oder ‚holistische‘, oder ‚nicht-separable‘ Erklärung finden, die auf mehr zurückgreift als nur auf die lokalen Zustände der Teile des Gesamtsystems. Damit zeigt sich, gemäss Bells autoritativer Interpretation, dass „gewisse bestimmte, gemäss der Quantenmechanik realisierbare Korrelationen lokal unerklärbar sind“ (1987, 151f).

In seiner scharfsinnigen philosophischen Würdigung der quantenmechanischen Nicht-Lokalität hält Tim Maudlin (1994, Kapitel 1) fest, dass diese nicht-lokale ‚Quantenverbindung‘ drei bemerkswerte Eigenschaften aufweist. Erstens ist sie *ungeschwächt*: im Gegensatz etwa zur klassischen Gravitationswirkung fällt sie mit zunehmender Distanz nicht ab. Zweitens ist sie *wählerisch*: während die Gravitationskraft auf alle ähnlich positionierten Körper mit ähnlicher Masse ähnlich wirkt, ist die durch die Verschränkung geschaffene Quantenverbindung eine ‚private‘ Angelegenheit zwischen den involvierten Teilchen. Drittens scheint sie *instantan*, also unabhängig der Distanz ohne jegliche Verzögerung, zu wirken.

Abschliessend soll nochmals betont werden, dass die gefundene Nicht-Lokalität ganz allgemein gilt, und nicht bloss für Theorien mit verborgenen Variablen. Und damit muss jede Hoffnung aufgegeben werden, eine im Wesentlichen klassische Theorie zu finden, die die Quantenphänomene erklären kann. Um auf die Themen des vorangegangenen Abschnitts zurückzukommen, muss angemerkt werden, dass die Nicht-Lokalität natürlich einen raumzeitlich strukturierten Hintergrund voraussetzt, der uns möglicherweise von der Quantengravitation verwehrt bleibt. Wenn die Raumzeit nicht fundamental ist sondern bloss emergent, dann kann auch die sie voraussetzende Nicht-Lokalität erst auf der emergenten Stufe auftreten. Dies könnte dann umgangen werden, wenn die Nicht-Lokalität auf eine glaubhafte Weise in fundamentalen Begriffen redefiniert werden kann. Die Raumzeit spielt auch sonst in der gegenwärtigen Diskussion um eine ‚primitive Ontologie‘ der Quantenmechanik eine zentrale, wenn oft auch nicht beachtete Rolle (siehe oben).

Die Grundlagen der Quantenmechanik sind neben den Raumzeittheorien (oder gegebenenfalls ‚keine-fundamentale-Raumzeit-Theorien‘) ein Gebiet, auf welchem die Philosophie, oder philosophische Betrachtungen von Physikern, wichtige Beiträge

geleistet hat. Zum Beispiel verdankt obige Formulierung des Messproblems ihre Prägnanz und ihre Unausweichlichkeit—aber natürlich nicht das Erkennen des Problems an sich, das in die Frühzeit der Quantenmechanik fällt—der unablässigen Arbeit von einigen Philosophen von den 1960er-Jahren bis in die 1990er-Jahre hinein. Auch einige der Lösungen des Messproblems sind zu wesentlichen Teilen das Ergebnis philosophischer Arbeit. So ist zum Beispiel das kürzlich erschienene Buch des Philosophen Wallace (2012) die wohl beste und kompletteste Verteidigung der Everett Interpretation, die momentan erhältlich ist.

Oftmals, und vielleicht sogar meistens, kann eine philosophische Betrachtung der Grundlagen der Physik allerdings nicht mehr klar von der Physik selber abgetrennt werden. Die Entwicklung der Kenntnis der Nicht-Lokalität unserer Welt liefert ein passendes Beispiel dazu. Diese Entwicklung beginnt 1935 mit dem wichtigen Artikel von Einstein, Boris Podolsky und Nathan Rosen, die basierend auf der Voraussetzung der Lokalität die Unvollständigkeit der Quantenmechanik beweisen wollen. Zu erwähnen ist auch Bells Arbeit in den 1960er-Jahren, die zum Beweis seines Theorems führt. Diese Leistung, genauso wie Bells spätere Ausarbeitung ihrer Implikationen, ist stark durch letztlich philosophische Grundlagenfragen motiviert. Auch die weiterführende Bewertung der Nicht-Lokalität, z. B. in ihrer Allgemeinheit in Maudlin 1994, ist oft entweder philosophisch, oder schwer davon zu trennen. Das bedeutet natürlich nicht, dass physikalische oder mathematische Aspekte dabei irrelevant sind; häufig resultieren entscheidende Fortschritte gerade im erfolgreichen Zusammenspiel aller drei Gebiete.

4 Methodologische Aspekte

Obwohl in der zeitgenössischen Philosophie der Physik weniger zentral als physikalische und metaphysische Fragestellungen, spielen erkenntnistheoretische oder methodologische Probleme doch auch eine Rolle und sollen deshalb hier nicht unerwähnt bleiben und zumindest an zwei sehr aktuellen Beispielen kurz exemplifiziert werden.

Erstens sehen wir uns in der gegenwärtigen Kosmologie mit grundsätzlichen methodologischen Fragen zur Selbstlokalisierung, zur eventuell verzerrten Auswahl von Evidenz in der Bestätigung von Theorien, zur Rolle von Anfangsbedingung und darüber definierten Wahrscheinlichkeitsverteilungen, bis hin zu allgemeinen Fragen in Bezug auf von wissenschaftlichen Theorien geforderten Erklärungsleistungen, konfrontiert.

Das auf der allgemeinen Relativitätstheorie fussende Standardmodell der Kosmologie beschreibt unser Universum als eine aus einer Anfangssingularität—dem ‚Urknall‘—entstandene, räumlich völlig homogene und isotrope Welt. Gemäss unseren besten Schätzungen hat dieser Urknall vor ungefähr 13.8 Milliarden Jahren stattgefunden. Dabei ist die geforderte Homogenität (oder wenigstens die Isotropie um unseren Standort herum) auf genügend grossen Skalen mit bemerkenswerter Genauigkeit nachgewiesen worden. Obwohl insgesamt ziemlich erfolgreich, ist das Standardmodell aber nicht ohne Probleme. Eines davon ist das sogenannte ‚Horizontproblem‘, wonach unser Universum zu ‚gross‘ ist als dass alle (heutigen) Orte seit dem Urknall in kausalem Austausch

gestanden haben könnten. Da sich das Licht mit endlicher Geschwindigkeit ausbreitet, können wir desto ‚weiter‘ in das All hinaus schauen und entferntere Galaxien beobachten, je länger wir warten. Dabei finden wir bis anhin in der kosmischen Hintergrundstrahlung aber immer nur weitere Bestätigungen der angenommenen Homogenität und Isotropie. Das Problem ist nun: Wenn es so viele Orte im Universum gibt, die seit dem Urknall in keiner kausalen Beziehung gestanden haben können, wie kann es dann sein, dass sie trotzdem alle so ähnlich beschaffen sind? Es scheint, als ob diese Frage im Standardmodell nur dann beantwortet werden kann, wenn wir akzeptieren, dass das Universum aus sehr speziellen Anfangsbedingungen entstanden ist, Anfangsbedingungen nämlich, die nahezu perfekt homogen sind. Angesichts aller scheinbar möglichen Anfangsbedingungen scheint es deshalb extrem unwahrscheinlich—ein kosmischer Zufall sozusagen—, dass wir gerade mit so homogenen ausgestattet sind. Damit dieser Einwand allerdings überhaupt artikulierbar wird, muss es möglich sein, eine Wahrscheinlichkeitsverteilung über dem Raum der möglichen Anfangsbedingungen zu definieren und diese zu rechtfertigen, was sehr umstritten bleibt. Da die momentan populäre inflationäre Kosmologie—explizit durch das Horizontproblem und ähnliche Überlegungen motiviert und gerechtfertigt—auf empirisch noch ziemlich wackligen Beinen steht, nehmen diese methodologischen Fragen für die zeitgenössische Kosmologie eine zentrale Rolle ein.²⁵

In der Kosmologie nimmt auch die sogenannte ‚anthropische‘ Argumentation oder Beweisführung eine wichtige, aber umstrittene, Rolle ein.²⁶ Eine Argumentation ist ‚anthropisch‘ wenn die Erklärungsleistung für eine beobachtete Tatsache zumindest teilweise dadurch erbracht wird, dass auf die Konsistenz der Beobachtung mit der Existenz intelligenten Lebens hingewiesen wird und damit sonst nicht zu eliminierende Alternativen ausgeschlossen werden. Ein anthropisches Argument nützt damit eine bestimmte systematische Selektion von Beobachtungen aus (‚observation selection bias‘). Steven Weinberg (1987) beispielsweise hat mit Hilfe von anthropischen Überlegungen eine obere Schranke für die kosmologische Konstante, Λ , berechnet. Ausgehend von einem ‚Multiversum‘ von Regionen mit frei variierendem Λ , kommen bloss diejenigen mit einem Wert für Λ , die intelligentes Leben, und damit mindestens gravitationell gebundene Zustände, erlauben, für ‚unsere‘ Region in Frage. Nachfolgende Messungen haben bis jetzt Weinberg’s Vorhersage bestätigt.

Das zweite Gebiet, auf dem wir beispielhalber die Wichtigkeit methodologischer Aspekte illustrieren wollen, ist die Quantengravitation. Leider ist es bis heute so, dass es keine Beobachtungen oder experimentelle Daten gibt, die eindeutig und weitherum akzeptiert schon nur die Notwendigkeit einer Quantentheorie der Gravitation aufzeigen, geschweige denn zwischen verschiedenen Ansätzen einen als empirisch am adäquatesten auswählen

²⁵ Vgl. Smeenk 2013, §6.

²⁶ Die Rolle ist umstritten weil anthropische Folgerungen von trivial bis inkohärent das ganze methodologische Spektrum abdecken und deshalb nicht in jeder Form universell anwendbar sind. Vgl. Smeenk 2013, §7.

können.²⁷ Zwar machen einige der Theorien in der Quantengravitation im Prinzip empirisch überprüfbare Vorhersagen; diese zu testen liegt allerdings noch weit ausserhalb unserer technischen Möglichkeiten. Interessanterweise akzeptieren die meisten Physiker in der Quantengravitation die Hawking-Strahlung und die Bekenstein-Hawking-Formel zur Berechnung der Entropie eines schwarzen Lochs als allgemein zu erreichende Messlatte, obwohl die Herleitungen auf zum Teil zweifelhaften—und in verschiedenen Ansätzen der Quantengravitation explizit verworfenen—semi-klassischen Prinzipien beruhen und weder die Hawking-Strahlung je beobachtet noch die Entropie eines schwarzen Lochs je gemessen wurde.

Die Stringtheorie—eine der führenden Ansätze in der Quantengravitation—zum Beispiel hat das Problem, dass sie praktisch alles voraussagt und deshalb keine falsifizierbaren Vorhersagen macht.²⁸ Die Theorie umfasst eine schier unvorstellbare Menge an Modellen, wovon unser Standardmodell der Teilchenphysik bloss eines ist. Vertreter der Stringtheorie haben diesen Einwand als einen ungerechtfertigten Schnellschuss der ‚Popperazzi‘ bezeichnet. Richard Dawid (2013) zum Beispiel liefert eine über die Länge eines ganzen Buches entwickelte Verteidigung der Stringtheorie als Vorbote einer neuen Phase wissenschaftlichen Fortschritts, die die ‚nicht-empirische Theorienbewertung‘ als legitim und zentral betrachtet. Sein Argument basiert hauptsächlich auf den folgenden drei Ideen. Erstens gebe es keine gangbare Alternative zur Stringtheorie. Zweitens habe die Stringtheorie mit zunehmender Erforschung eine a priori unerwartete explanatorische Kohärenz gezeigt. Und drittens verfolge die Stringtheorie die erprobte Strategie der konservativen Erweiterung von bestehenden und nachweislich erfolgreichen physikalischen Theorien (hier das Standardmodell der Teilchenphysik).

Ohne diese Debatte hier weiterzuführen ist damit hoffentlich klar, dass die gegenwärtige Physik auch reichlich Anlass zu methodologischer und erkenntnistheoretischer Arbeit, wie sie üblicherweise von Wissenschaftsphilosophen und Wissenschaftsphilosophinnen betrieben wird, gibt—und diese vielleicht sogar benötigt.

5 Abschliessende Bemerkungen

Dieser Artikel hat versucht, einen notwendigerweise unvollständigen und kursiven Blick auf die aktuelle Philosophie der Physik zu vermitteln. Viele der im Literaturverzeichnis aufgelisteten Werke eignen sich hervorragend für eine vertiefte Beschäftigung mit dem Gebiet oder einzelnen Aspekten davon. Viele der hier angeschnittenen Fragen—etwa gerade derjenigen nach der fundamentalen Natur von Raum und Zeit, und zwischen dieser Struktur und dem Materiegehalt des Universums—werden auf absehbare Zeit zentrale Themen sowohl der Physik als auch der Philosophie bleiben.

²⁷ Diese Situation hat sich leider seit dem Erscheinen im Jahr 2001 von Callenders und Huggetts Sammelband nicht wesentlich verändert.

²⁸ Dieser Vorwurf an die Adresse der Stringtheorie wurde zum Beispiel mit grossem Effekt von Peter Woit (2006) popularisiert.

Weiterhin beschäftigen wird uns auch die Frage nach der Rolle der Philosophie in der physikalischen Forschung sowie allgemeiner nach dem Verhältnis von Physik und Philosophie. Dieses Thema wurde in letzter Zeit gerade im englischsprachigen Raum zum Teil mit unerbittlicher Schärfe und bei manchen Gelegenheiten auf eine sehr antagonistische Art und Weise diskutiert—man denke etwa an David Alberts Buchrezension (2012) von Lawrence Krauss' *A Universe From Nothing* und dessen bitterscharfe Retorte in einem Interview mit Ross Anderson in *The Atlantic* (Anderson 2012). Obwohl diese beiden Autoren Amerikaner sind, wird das Thema momentan auch auf europäischen und globalen Konferenzen rege diskutiert. Ich hoffe auch, mit diesem Essay einen konstruktiven Beitrag zu dieser Debatte erbracht zu haben.

Literaturempfehlungen

Leider gibt es kaum empfehlenswerte Textbücher, die die gesamte Philosophie der Physik abdecken. Als Einführung in die Philosophie der Raumzeit eignen sich Earman 1989, Dainton 2010 und insbesondere Huggett 2010. Für das Messproblem in der Quantentheorie und die wichtigsten Interpretationen ist Albert 1992 eine sehr nachvollziehbare Einführung, Wallace 2012 ein lesbarer Überblick über die gegenwärtig am meisten diskutierte Version einer Everett Interpretation und Barrett 1999 ein gutes Komplement dazu. Für die Nichtlokalität der Quantentheorie und ihre Vereinbarkeit mit der Relativitätstheorie ist Maudlin 1994 zu empfehlen, das 2011 bereits in dritter Auflage erschienen ist. Wer sich vertieft mit besonderen Themen beschäftigen will, der ist mit der hervorragenden Sammlung von Butterfield und Earman (2007) bestens bedient, und kann aktuelle und im allgemeinen sehr gute Artikel zu speziellen Themen frei zugänglich in der *Stanford Encyclopedia of Philosophy* finden.

Für deutschsprachige Leser und Leserinnen empfiehlt sich die preiswerte Sammlung von Esfeld (2012), deren Aufsätze kollektiv den grössten Teil der Philosophie der Physik abdecken und einen idealen Einstieg in das Gebiet bieten. Sieroka 2014 ist ein kürzlich erschienenenes Taschenbuch, das eine sehr lesbare und kurze Einführung gibt, mit einem Schwerpunkt in der Geschichte der Physik und in erkenntnistheoretischen Fragen. Friebe et al. 2015 sammelt schon ein wenig anspruchsvollere Aufsätze, aber liefert einen idealen Einstieg in die Philosophie der Quantenphysik für all diejenigen, die sich tiefer mit dem Gebiet auseinandersetzen wollen.

Literaturverzeichnis

Albert, David Z (1992). *Quantum Mechanics and Experience*. Cambridge, MA: Harvard University Press.

Albert, David Z (1996). Elementary quantum metaphysics. In: James T Cushing, Arthur Fine und Sheldon Goldstein (Hg.). *Bohmian Mechanics and Quantum Theory: An Appraisal*. Dordrecht: Kluwer, 277-284.

Albert, David Z (2012). On the origin of everything: 'A Universe From Nothing,' by Lawrence M. Krauss. *New York Times: Sunday Book Review*, 25. März 2012, BR20.

Anderson, Ross (2012). Has physics made philosophy and religion obsolete?. 23. April 2012. Abrufbar unter <http://www.theatlantic.com/technology/archive/2012/04/has-physics-made-philosophy-and-religion-obsolete/256203/>.

Bain, Jonathan (2011). Quantum field theories in classical spacetimes and particles. *Studies in the History and Philosophy of Modern Physics*, 42, 98-106.

Barbour, Julian B und Bertotti, Bruno (1982). Mach's Principle and the structure of dynamical theories. *Proceedings of the Royal Society of London A*, 382, 295-306.

Barrett, Jeffrey A (1999). *The Quantum Mechanics of Minds and Worlds*. New York: Oxford University Press.

Batterman, Robert (Hg.) (2013). *The Oxford Handbook of Philosophy of Physics*. New York: Oxford University Press.

Bell, John S (1964). On the Einstein-Podolsky-Rosen paradox. *Physics*, 1, 195-200.

Bell, John S (1987). *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics*. Cambridge: Cambridge University Press.

Belot, Gordon (1999). Rehabilitating relationalism. *International Studies in the Philosophy of Science*, 13, 35-52.

Black, Max (1952). The identity of indiscernibles. *Mind*, 61, 153-164.

Bohm, David (1952). A suggested interpretation of the quantum theory in terms of 'hidden' variables (Part I and II). *Physical Review*, 85, 166-179 und 180-193.

Brown, Harvey (2005). *Physical Relativity: Space-time structure from a dynamical perspective*. Oxford: Oxford University Press.

Butterfield, Jeremy und Earman, John (Hg.) (2007). *Philosophy of Physics*. Zwei Bände. Amsterdam: Elsevier.

Callender, Craig (2015). One world, one beable. *Synthese*, 192, 3153-3177.

Callender, Craig und Huggett, Nick (2001). *Physics Meets Philosophy at the Planck Scale: Contemporary Theories in Quantum Gravity*. Cambridge: Cambridge University Press.

Conway, John H und Kochen, Simon (2006). The free will theorem. *Foundations of Physics*, 36, 1441-1473.

Dainton, Barry (2010). *Time and Space*. Oxford: Routledge.

Dawid, Richard (2013). *String Theory and the Scientific Method*. Cambridge: Cambridge University Press.

Earman, John (1989). *World Enough and Space-Time: Absolute versus Relational Theories of Space and Time*. Cambridge, MA: MIT Press.

Earman, John und Norton, John D. (1987). What price spacetime substantivalism. *British Journal for the Philosophy of Science*, 38, 515–525.

Einstein, Albert, Podolsky, Boris und Rosen, Nathan (1935). Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?. *Physical Review*, 47, 777-780.

Esfeld, Michael (Hg.) (2012). *Philosophie der Physik*. Frankfurt a.M.: Suhrkamp.

Esfeld, Michael (2014). Quantum Humeanism, or: physicalism without properties. *Philosophical Quarterly*, 64, 453-470.

Esfeld, Michael, Hubert, Mario, Lazarovici, Dustin und Dürr, Detlef (2014). The ontology of Bohmian mechanics. *British Journal for the Philosophy of Science*, 65, 773-796.

Everett, Hugh (1957). ‚Relative state‘ formulation of quantum mechanics. *Reviews of Modern Physics*, 29, 454-462.

Friebe, Cord, Kuhlmann, Meinard, Lyre, Holger, Näger, Paul, Passon, Oliver und Stöckler, Manfred (2015). *Philosophie der Quantenphysik: Einführung und Diskussion der zentralen Begriffe und Problemstellungen der Quantentheorie für Physiker und Philosophen*. Heidelberg: Springer.

Ghirardi, Giancarlo (2011). Collapse Theories. In: Edward N. Zalta (Hg.). *Stanford Encyclopedia of Philosophy*, <http://plato.stanford.edu/entries/qm-collapse/>.

Ghirardi, Giancarlo, Rimini, Alberto und Weber, Tullio (1986). Unified dynamics for microscopic and macroscopic systems. *Physical Review D*, 34: 470-491.

Healey, Richard (2015). How pragmatism reconciles quantum mechanics with relativity etc. Interview in *3:AM Magazine*, <http://www.3ammagazine.com/3am/how-pragmatism-reconciles-quantum-mechanics-with-relativity-etc/>.

Huggett, Nick (2006). The regularity account of relational spacetime. *Mind*, 115, 41-73.

Huggett, Nick (2010). *Everywhere and Everywhen: Adventures in Physics and Philosophy*. New York: Oxford University Press.

Huggett, Nick und Wüthrich, Christian (2013). Emergent spacetime and empirical (in)coherence. *Studies in the History and Philosophy of Modern Physics*, 44, 276-285.

Huggett, Nick und Wüthrich, Christian (im Erscheinen). *Out of Nowhere: The Emergence of Spacetime in Quantum Theories of Gravity*. Oxford: Oxford University Press.

Ladyman, James und Ross, Don (2007). *Every Thing Must Go: Metaphysics Naturalized*. Oxford: Oxford University Press.

Malament, David B (1996). In defense of dogma: Why there cannot be a relativistic quantum mechanical theory of (localizable) particles. In: Rob Clifton (Hg.). *Perspectives on Quantum Reality: Relativistic, Non-Relativistic, and Field-Theoretic*. Dordrecht: Kluwer, 1-10.

Malament, David B (2012). *Topics in the Foundations of General Relativity and Newtonian Gravitation Theory*. Chicago und London: University of Chicago Press.

Maudlin, Tim (1994). *Quantum Non-Locality and Relativity: Metaphysical Intimations of Modern Physics*. Oxford: Basil Blackwell.

Maudlin, Tim (1995). Three measurement problems. *Topoi*, 14, 7-15.

Mermin, N David (1985). Is the moon there when nobody looks? Reality and the quantum theory. *Physics Today*, April, 38-47.

Miller, Elizabeth (2014). Quantum entanglement, Bohmian mechanics, and Humean supervenience. *Australasian Journal of Philosophy*, 92, 567-583.

Ney, Alyssa und Albert, David Z (2013). *The Wave Function: Essays on the Metaphysics of Quantum Mechanics*. New York: Oxford University Press.

Ney, Alyssa und Phillips, Kathryn (2013). Does an adequate physical theory demand a primitive ontology?. *Philosophy of Science*, 80, 454-474.

Norton, John D. (1999). The cosmological woes of Newtonian Gravitation Theory. In: Hubert Goenner, Jürgen Renn, Jim Ritter und Tilman Sauer (Hg.). *The Expanding Worlds of General Relativity: Einstein Studies, Volume 7*. Boston: Birkhäuser, 271-322.

Norton, John D. (2014). The Hole Argument. In: Edward N. Zalta (Hg.). *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*. <http://plato.stanford.edu/archives/spr2014/entries/spacetime-holearg/>.

Pooley, Oliver (2013). Substantialist and relationalist approaches to spacetime. In: Robert Batterman (Hg.). *The Oxford Handbook of Philosophy of Physics*. New York: Oxford University Press, 522-586.

Pooley, Oliver (im Erscheinen). *The Reality of Spacetime*. Oxford: Oxford University Press.

Saunders, Simon, Barrett, Jonathan, Kent, Adrian, and Wallace, David (Hg.) (2010). *Many Worlds? Everett, Quantum Theory, and Reality*. Oxford: Oxford University Press.

Sieroka, Norman (2014). *Philosophie der Physik: Eine Einführung*. München: C.H.Beck.

Smeenk, Chris (2013). Philosophy of Cosmology. In: Robert Batterman (Hg.). *The Oxford Handbook of Philosophy of Physics*. New York: Oxford University Press, 607-652.

Smith, Sheldon R (2007). Continuous bodies, impenetrability, and contact interactions: The view from the applied mathematics of continuum mechanics. *British Journal for the Philosophy of Science*, 58, 503-538.

Wallace, David (2012). *The Emergent Multiverse: Quantum Theory According to the Everett Interpretation*. Oxford: Oxford University Press.

Weinberg, Steven (1987). Anthropic Bound on the Cosmological Constant. *Physical Review Letters*, 59, 2607-2610.

Woit, Peter (2006). *Not Even Wrong: The Failure of String Theory and the Search for Unity the Physical Law*. New York: Basic Books.

Wüthrich, Christian (2011). Can the world be shown to be indeterministic after all?. In: Claus Beisbart und Stephan Hartmann (Hg.). *Probabilities in Physics*. Oxford: Oxford University Press, 365-389.

Wüthrich, Christian (im Erscheinen). Putnam looks at quantum mechanics (again and again). In: Michael Frauchiger (Hg.). *Themes from Putnam* (Lauener Library of Analytical Philosophy, Volume 5). Berlin: De Gruyter.