

## 5. Das Messproblem der Quantenmechanik heute: Übersicht und Bewertung

### Michael Esfeld

(in Michael Esfeld (Hg.): *Philosophie der Physik*. Berlin: Suhrkamp 2012, S. 88–109)

#### 5.1 Das Messproblem

Die Interpretation der Quantenmechanik wirft ein Problem auf, das als das Messproblem bekannt ist. Betrachten wir die folgende Formulierung dieses Problems von Tim Maudlin:

„1A Die Wellenfunktion eines Systems ist *vollständig*, das heißt, die Wellenfunktion spezifiziert (direkt oder indirekt) alle physikalischen Eigenschaften eines Systems.

1B Die Wellenfunktion entwickelt sich immer gemäß einer linearen dynamischen Gleichung (zum Beispiel der Schrödinger-Gleichung).

1C Messungen von zum Beispiel dem Spin eines Elektrons haben immer (oder zumindest gewöhnlich) definite Ergebnisse. Das heißt, am Ende einer Messung ist das Messgerät entweder in einem Zustand, der Spin plus anzeigt (und nicht minus) oder der Spin minus anzeigt (und nicht plus).“ (Maudlin 1995, S. 7, Übersetzung M. E.; siehe auch die Axiome A1-A5 in dem Beitrag von Held, Abschn. 4.3)

Das Problem ist, dass es keine Formulierung der Quantenmechanik geben kann, die alle drei dieser Behauptungen respektiert, weil deren Konjunktion inkonsistent ist. Insbesondere gilt: Wenn die Wellenfunktion die vollständige Beschreibung der dynamischen Eigenschaften eines physikalischen Systems enthält und wenn sie sich immer gemäß einer linearen dynamischen Gleichung entwickelt, dann kann sie sich nicht so entwickeln, dass ein Quantensystem einen definiten Wert einer dynamischen Eigenschaft hat, wie zum Beispiel einen bestimmten Wert des Ortes oder des Spin, und dass ein Messgerät einen solchen definiten Wert anzeigt.<sup>1</sup> Wir müssen daher eine der genannten drei Behauptungen aufgeben. Welche Behauptung fallen gelassen werden soll, kann durch keine uns bekannten Experimente entschieden werden. Jede Lösung des Messproblems erfordert es daher, die begrifflichen Instrumentarien philosophischer Argumentation einzusetzen. Das Messproblem ist deshalb ein Paradebeispiel für die Verzahnung von Philosophie und Physik: Es betrifft nicht nur die Interpretation einer gegebenen physikalischen Theorie im Sinne einer Antwort auf die Frage, was die Theorie über die Welt aussagt, sondern die mathematische Formulierung der Theorie selbst. Je nachdem, welche der drei genannten Behauptungen man aufgibt, ergibt sich ein anderer Formalismus und damit eine andere Quantentheorie.

---

<sup>1</sup>Die dynamischen Eigenschaften eines physikalischen Systems sind diejenigen seiner Eigenschaften, deren Wert sich in der Zeit ändern kann. So sind zum Beispiel Ort, Impuls und Spin in jeder Raumrichtung dynamische Eigenschaften eines Quantensystems, nicht jedoch Masse und Ladung.

Der Ausdruck „Messproblem“ ist irreführend. Der Begriff der Messung spielt für die Formulierung dieses Problems keine Rolle. Es gibt keine physikalische Definition dessen, was eine Messung ist, und es kann eine solche auch nicht geben: Messungen sind kein eigener Typ physikalischer Interaktionen zusätzlich zu der starken, der schwachen, der elektromagnetischen und der gravitationellen Wechselwirkung, sondern eine gewöhnliche physikalische Interaktion. Und Messgeräte sind keine natürliche Art zusätzlich zu Elektronen, Protonen, chemischen Elementen, Molekülen, biologischen Spezies und so weiter. Vielmehr können beliebige makroskopische Objekte, die in der Lage sind, zuverlässig mit den Eigenschaften mikroskopischer Objekte korreliert zu werden, als Messgeräte benutzt werden. Wir können daher die Behauptung 1C durch die folgende, etwas kompliziertere Behauptung ersetzen, die nicht auf Messungen, sondern nur auf makroskopische Systeme Bezug nimmt:

1C\* Die uns umgebenden makroskopischen Systeme – wie zum Beispiel Steine, Bäume, Katzen, Personen usw. – haben immer (oder zumindest gewöhnlich) einen definiten Ort im Raum, und diese Systeme sind aus mikroskopischen Quantensystemen zusammengesetzt.

Folglich müssen Quantensysteme zumindest manchmal einen Ortswert haben, der definit genug ist, dass sie makroskopische Systeme aufbauen können, die an einem bestimmten Ort lokalisiert sind. Wenn jedoch die Wellenfunktion alle dynamischen Eigenschaften von Quantensystemen spezifiziert und wenn die Wellenfunktion sich immer gemäß einer linearen dynamischen Gleichung entwickelt, dann ist es ausgeschlossen, dass Quantensysteme Ortswerte haben können, die definit genug sind, dass sie makroskopische Systeme bilden können, die an einem bestimmten Ort lokalisiert sind.

Gehen wir kurz darauf ein, wieso die Quantenmechanik in dieses Problem hineinläuft (siehe dazu ausführlich das Einführungsbuch Esfeld 2011, Kap. V). Der Grund ist das Superpositions-Prinzip. Wenn zum Beispiel Spin plus und Spin minus die beiden möglichen definiten Werte des Spins eines Elektrons in jeder der drei orthogonalen Raumrichtungen sind, dann erlaubt die Quantenmechanik – im Gegensatz zur klassischen Mechanik – nicht nur Zustände, in denen das Elektron entweder den Wert Spin plus oder den Wert Spin minus in einer gegebenen Richtung hat, sondern auch Zustände, in denen diese beiden Werte miteinander überlagert sind. Solche Zustände sind in der Quantenmechanik unvermeidbar. Wenn das Elektron zum Beispiel in einem Zustand ist, in dem es entweder Spin plus oder Spin minus in Richtung der  $x$ -Achse hat, dann kann es keinen bestimmten Wert des Spins in Richtung der  $y$ -Achse oder der  $z$ -Achse haben; in Bezug auf die  $y$ -Richtung oder die  $z$ -Richtung ist sein Zustand der einer Überlagerung (Superposition) der Werte Spin plus und Spin minus. Nehmen wir nun an, dass man eine Messvorrichtung aufbaut, um den Spin des Elektrons in der  $z$ -Richtung zu messen. Wenn jedoch die Dynamik des Quantensystems sich immer gemäß einer linearen Gleichung wie der Schrödinger-Gleichung

entwickelt, dann gibt es keine Möglichkeit, dass das System jemals in einen Zustand gerät, in dem es einen bestimmten Wert des Spin in der  $z$ -Richtung hat, der von einem Messgerät angezeigt wird. Aber natürlich ist es möglich, solche Messungen durchzuführen, und sie haben Ergebnisse; am Ende einer solchen Messung zeigt das Gerät entweder den Wert Spin plus oder den Wert Spin minus an. Analoge Überlegungen treffen auf alle anderen dynamischen Eigenschaften von Quantensystemen zu, insbesondere deren Ortswert.

Wenn man zwei (oder mehr) Systeme betrachtet, die miteinander interagieren, wird die Abweichung von der klassischen Mechanik noch deutlicher. In diesem Falle werden die Zustände beider Systeme sehr schnell miteinander verschränkt, so dass keines der beiden Systeme einen definiten Wert irgendeiner seiner dynamischen Eigenschaften hat. Aber es gibt stabile Korrelationen zwischen den möglichen definiten Werten der dynamischen Eigenschaften der beiden Systeme. Zustandsverschränkungen bilden den Kern des Messproblems: Wenn ein Quantensystem mit einem makroskopischen System interagiert, das als Messgerät fungiert, dann werden gemäß dem Formalismus der Quantentheorie die Zustände beider Systeme miteinander verschränkt, statt dass das Quantensystem einen definiten Wert einer dynamischen Eigenschaft hat und das Messgerät in einem Zustand ist, der einen solchen definiten Wert anzeigt. Das Beispiel von Schrödingers Katze verdeutlicht diese Situation drastisch: Es ist nicht so, dass ENTWEDER kein Atom zerfallen ist und die Katze lebendig ist ODER ein Atom zerfallen ist und die Katze tot ist, sondern der Zustand des Gesamtsystems ist eine Überlagerung (Superposition) dieser beiden Korrelationen.

Diese Korrelationen der Zustandsverschränkung sind zudem unabhängig vom räumlichen Abstand der betroffenen Systeme. Betrachten wir zwei Elektronen, die zusammen von einer Quelle in einem Spin-Zustand emittiert werden, der als Singulett-Zustand bekannt ist. Keines der beiden Elektronen hat einen definiten Wert des Spin in irgendeiner Raumrichtung; aber es bestehen folgende Korrelationen: Wenn das eine System den definiten Wert Spin plus in einer Raumrichtung erwirbt, dann erwirbt das andere System den Wert Spin minus in derselben Raumrichtung (oder umgekehrt), wie groß auch immer der räumliche Abstand zwischen beiden Systemen sein mag. Diese Korrelationen sind sehr gut bestätigt durch Experimente, in denen die beiden Messungen durch einen »raumartigen Abstand« voneinander getrennt sind. Folglich können diese Messungen nicht durch ein Signal miteinander verbunden sein, das sich höchstens mit Lichtgeschwindigkeit ausbreitet.

Das Theorem von John Bell von 1964 (wieder abgedruckt in Bell 1987, Kap. 2) beweist, dass es nicht möglich ist, die Korrelationen zwischen den Messergebnissen, welche die Quantenmechanik voraussagt und welche experimentell bestätigt sind, unter der Annahme zu erklären, dass es für diese gemessenen Korrelationen eine gemeinsame Ursache im Vergangenheits-Lichtkegel gibt – wie etwa die Präparation des Elektronenpaares im Singulett-Zustand an der Quelle des

Experiments. Das ist die berühmte *Nicht-Lokalität* der Quantenphysik: Die Wahrscheinlichkeiten für bestimmte Messergebnisse an bestimmten Raumzeitpunkten sind nicht vollständig festgelegt durch das, was im Vergangenheits-Lichtkegel der betreffenden Punkte existiert; Ereignisse, die an Punkten stattfinden, die durch einen raumartigen Abstand von den genannten Punkten getrennt sind, fließen in die Wahrscheinlichkeiten für das, was an diesen Punkten geschieht, ein. So verändert das Ergebnis einer Spin-Messung an dem einen Elektron die Wahrscheinlichkeiten für das Ergebnis einer Spin-Messung an dem anderen Elektron, auch wenn beide Elektronen durch einen raumartigen Abstand voneinander getrennt sind (siehe Maudlin 2011 für eine detaillierte Analyse dieser Nicht-Lokalität).

## 5.2 Ein genereller Rahmen für alle Lösungen

Versuchen wir zunächst, generelle Bedingungen zu formulieren, die jede Erklärung der genannten korrelierten Messergebnisse – und damit jede Lösung des Messproblems – erfüllen muss, um überzeugen zu können. Auf den ersten Blick mag es scheinen, dass Wechselwirkungen anzuerkennen, die sich instantan über beliebige räumliche Abstände ausbreiten, eine solche Bedingung ist. Demnach zwingt uns die Nicht-Lokalität der Quantenphysik dazu, Fernwirkungen wieder anzuerkennen, auf die Newtons Theorie der Gravitation festgelegt war, die jedoch Einsteins allgemeine Relativitätstheorie aus der Physik verbannt hat. Einsteins Vision einer Physik ohne Fernwirkungen wäre demnach nur von kurzer Dauer gewesen. Aber dem ist nicht so. Keine Erklärung auf der Basis von Fernwirkungen ist in der Literatur ernsthaft verfolgt worden.<sup>2</sup>

Alternativ mag man versuchen, die gemessenen Korrelationen durch eine gemeinsame Ursache zu erklären – das heißt, eine gemeinsame Ursache sowohl der Präparation des Singulett-Zustandes an der Quelle des Experiments als auch des Festlegens der zu messenden Parameter in beiden Flügeln des Experiments. Selbst wenn eine solche Ursache in der gemeinsamen Vergangenheit der beiden Flügel des Experiments liegen sollte, müsste sie über raumzeitliche Lücken hinweg wirken. Betrachten wir zwei Situationen, die identisch in Bezug auf die Situation im rechten Flügel des Experiments sind (das heißt in allem von der Quelle bis zur Fixierung des rechts zu messenden Parameters identisch sind), sich aber durch den Parameter unterscheiden, der im linken Flügel gemessen wird; infolgedessen sind gemäß Bells Theorem die Wahrscheinlichkeiten für das Messergebnis im *rechten* Flügel verändert. Wenn man diesen Unterschied auf eine gemeinsame Ursache zurückführen will, muss man folglich annehmen, dass diese gemeinsame Ursache über raumzeitliche Lücken hinweg die Wahrscheinlichkeiten für das Messergebnis im rechten Flügel verändert.

---

<sup>2</sup>Die Möglichkeit einer solchen Erklärung wird von Chang und Cartwright (1993, Teil III) in Erwägung gezogen, ohne ausgearbeitet oder vertreten zu werden.

Eine dritte Möglichkeit in diesem Zusammenhang ist, ein zeitlich rückwärts gerichtetes Signal zu postulieren, das *nach* der Messung den Ausgangszustand an der Quelle verändert (siehe Price 1996, Kap. 8 und 9, sowie die Artikel in *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 39 (2008), S. 705-840, für eine Diskussion dieser Option). Aber wiederum liegt keine physikalisch präzise Ausarbeitung dieser Idee vor, und es bestehen gravierende Einwände – insbesondere derjenige geschlossener kausaler Schleifen: Kurz gesagt, wenn es zeitlich rückwärts gerichtete Signale in den Bell-Experimenten gibt, dann ist sowohl *B* Ursache von *A* (das in der Vergangenheit von *B* liegt), als auch *A* Ursache von *B* (das in der Zukunft von *A* liegt) (siehe Berkovitz 2008).

Eine dieser drei Optionen zu verfolgen, mag auf den ersten Blick attraktiv erscheinen, weil Folgendes offensichtlich zu sein scheint: Aufgrund ihrer räumlichen Trennung sind die beiden Quantensysteme, deren Spin gemessen wird, voneinander separierte Entitäten – in dem Sinne, dass jedem von ihnen ein Zustand unabhängig von dem anderen System zukommt, der dessen Eigenschaften spezifiziert. Anders gesagt: Wenn die beiden Systeme in diesem Sinne voneinander separierte Entitäten wären, dann wäre Fernwirkung (entweder direkt oder durch eine gemeinsame Ursache, die über raumzeitliche Lücken hinweg wirkt) oder zeitlich rückwärts gerichtete Kausalität die einzige Möglichkeit, um die genannten Korrelationen zu erklären. Wenn man anerkennt, dass diese Optionen in eine Sackgasse führen, bedeutet dies folglich, dass man die Voraussetzung separierter Zustände der beiden Quantensysteme fallen lassen muss. Man gelangt dann dazu, eine Art von *Nicht-Separabilität* und damit eine Form von *Holismus* anzuerkennen (Teller 1986): Obwohl die beiden Quantensysteme durch einen beliebigen räumlichen Abstand voneinander getrennt sein können, bleiben sie durch bestimmte Relationen (nämlich Relationen der Zustandsverschränkung) miteinander verbunden, und diese Relationen sind durch keine Eigenschaften festgelegt, die jedem der beiden Quantensysteme unabhängig von dem anderen System zukommen (das heißt, sie sind durch keine intrinsischen Eigenschaften festgelegt). Folglich ist es nicht möglich, jedem dieser beiden Systeme für sich genommen einen Zustand zuzuschreiben, der dessen Eigenschaften vollständig spezifiziert.

Diese Nicht-Separabilität ist das Neue an der Quantentheorie, und sie generiert das Messproblem. Sie steht im Widerspruch zu Einsteins Leitidee in der speziellen – und auch der allgemeinen – Relativitätstheorie, gemäß welcher für das, was es an einem Punkt der Raumzeit gibt, ausschließlich Faktoren relevant sind, die sich in dessen Vergangenheits-Lichtkegel befinden (Einstein 1948, S. 321-322). Aber entgegen Einsteins Einschätzung bedeutet dieser Widerspruch nicht, dass man gezwungen ist, einen Schritt zurück zur Newton'schen Fernwirkung zu tun. Mit der Anerkennung von Nicht-Separabilität tut man vielmehr einen Schritt vorwärts zu einer bestimmten Form von Holismus (statt eines Atomismus) in der Naturphilosophie.

Die Position, die als *ontischer Strukturrealismus* in der heutigen Literatur bekannt ist (Ladyman 1998, French und Ladyman 2003, Ladyman und Ross 2007), kann man als den Versuch ansehen, einen ontologischen Rahmen zu formulieren, der diesen Holismus präzisiert. Unter einer Struktur kann man hier ein Netz konkreter physikalischer Relationen verstehen (wie die genannten Quanten-Korrelationen), die keine ihnen zugrunde liegenden Objekte voraussetzen, welche über eine intrinsische Identität verfügen (das heißt eine Identität, die unabhängig von diesen Relationen ist). Es besteht keinerlei Grund dafür, in diesem Zusammenhang die Annahme fallen zu lassen, dass es überhaupt Objekte gibt, wie die Position, die als moderater ontischer Strukturrealismus bekannt ist, klarstellt (siehe Esfeld 2004, Esfeld und Lam 2008 und 2011): Wenn es Relationen gibt, gibt es selbstverständlich auch Objekte als dasjenige, was in den betreffenden Relationen steht; aber die Relationen – statt intrinsischer Eigenschaften, welche eine intrinsische Identität bereitstellen – sind die Weisen (Modi), wie die Objekte existieren.

Schon auf diesem allgemeinen Niveau hat der ontische Strukturrealismus gewichtige Konsequenzen für die Metaphysik von Objekten und Eigenschaften: Er stellt Relationen über intrinsische Eigenschaften und weist die Idee einer intrinsischen Identität von Objekten zurück. Ferner geht er mit der Festlegung auf modale Eigenschaften zusammen und widerspricht damit der Position, die in der heutigen Literatur als Hume'sche Metaphysik bekannt ist: Die Strukturen, von denen der ontische Strukturrealismus handelt, können keine kategorialen und damit rein qualitative Eigenschaften sein. Sie sind notwendigerweise an eine bestimmte nomologische Rolle gebunden. Um diesen Sachverhalt zu illustrieren, nehmen wir einmal an, dass die physikalischen Begriffe der Masse und der Ladung sich auf intrinsische Eigenschaften beziehen, die Hume'sche kategoriale Eigenschaften sind. Dann gibt es eine mögliche Welt, in der die Eigenschaft, die in der aktuellen Welt die Masse-Rolle spielt, die Ladungs-Rolle spielt (und umgekehrt).<sup>3</sup> Hingegen ergibt es keinen Sinn, eine mögliche Welt konzipieren zu wollen, in welcher die Struktur, die in der aktuellen Welt die Rolle der Quantenrelationen der Zustandsverschränkung spielt, die Rolle der raumzeitlichen, metrischen Relationen einnimmt (und umgekehrt). Wenn etwas eine Struktur ist, übt es notwendigerweise eine bestimmte nomologische Rolle aus, weil bestimmte Relationen für es essentiell sind.<sup>4</sup>

Man kann noch einen Schritt weitergehen in der Konzeption des Strukturrealismus als eines ontologischen Rahmen für jede Interpretation der Quantenmechanik, die eine Lösung des Messproblems bietet. Selbst wenn es für Strukturen essentiell ist, eine bestimmte nomologische Rolle einzunehmen, sind sie allein dadurch nicht mit einer Dynamik verbunden. Wenn man den Strukturrealismus für eine konkrete Lösung des Messproblems einsetzen will, muss man die

---

<sup>3</sup>Deshalb ist die Hume'sche Metaphysik auf die Position festgelegt, die in der heutigen Literatur als Quidditismus bekannt ist; siehe zum Beispiel Lewis (2009).

<sup>4</sup>Lyre (2010 und 2011b) bestreitet diese Behauptung verbal, indem er einen angeblich Hume'schen Strukturrealismus vertritt, bestätigt diese Behauptung jedoch de facto, indem er bestimmte Symmetrie-Relationen als essentiell für eine Struktur ansieht; siehe dazu den Beitrag von Lyre, Abschn. 18.3.

Strukturen der Quanten-Zustandsverschränkungen in eine Dynamik integrieren. Man kann ein generelles Kriterium für jede solche Integration formulieren (obwohl ein solches Kriterium umstritten ist, siehe zum Beispiel Psillos 2011 gegen Esfeld 2009): Die nomologische Rolle, welche physikalische Strukturen notwendigerweise einnehmen, ist eine kausale Rolle. Um physikalische von mathematischen Strukturen zu unterscheiden und damit diese Strukturen für die Dynamik physikalischer Systeme relevant sind, ist es erforderlich, sie als kausal wirksam anzusehen. Anders gesagt, indem sie bestimmte Strukturen bilden, sind Objekte oder Ereignisse kausal wirksam, so dass die betreffenden Strukturen als Ganze bestimmte Wirkungen hervorbringen (siehe dazu ausführlich Esfeld und Sachse 2010, Kap. 2).

### 5.3 Viele Welten?

Kommen wir nun auf das Messproblem zurück und untersuchen wir, wie wir ausgehend von dem naturphilosophisch Neuen in der Quantenphysik – der Nicht-Separabilität, die der ontische Strukturenrealismus auf den Punkt bringt – zu einer Lösung des Messproblems gelangen können. Da das Problem darin besteht, dass die Konjunktion der zu Beginn dieses Artikels zitierten drei Behauptungen inkonsistent ist, müssen wir eine dieser Behauptungen fallen lassen. Damit gelangen wir zu drei Lösungsmöglichkeiten.

Wenn man 1C (und damit auch 1C\*) zurückweist, kann man die Wellenfunktion so ansehen, dass sie eine vollständige Beschreibung der physikalischen Eigenschaften gibt (1A) und dass sie sich immer gemäß der Schrödinger-Dynamik entwickelt (1B); aber man muss dann 1C durch eine Erklärung dessen ersetzen, wie es dazu kommt, dass Beobachter definite Eigenschaften von sich selbst (ihres Bewusstseins und ihres Körpers) und ihrer Umgebung wahrnehmen. In diesem Zusammenhang ist es üblich, sich auf Dekohärenz zu beziehen (siehe dazu ausführlich Schlosshauer 2007). Dekohärenz basiert darauf, die Umgebung eines Quantensystems zu berücksichtigen. Obwohl Dekohärenz nicht zu weniger, sondern zu mehr Verschränkung führt, indem der Zustand des Quantensystems mit den Zuständen aller Systeme in seiner Umgebung verschränkt wird, wird häufig behauptet, dass aufgrund der enorm vielen Freiheitsgrade der Umgebung ein lokaler Beobachter keinen Zugang zu dieser Verschränkung hat; infolgedessen erscheint dem lokalen Beobachter die Welt so, als ob es definite Werte von Eigenschaften gäbe (auch Kiefer vertritt in seinem Beitrag, Abschn. 13.2, eine solche Behauptung).

Es ist jedoch nicht ersichtlich, wie diese Behauptung gerechtfertigt werden könnte: Zunächst einmal gibt es keine Berechtigung dafür, einen *lokalen* Beobachter einzuführen, da, solange wir allein die Wellenfunktion und Dekohärenz betrachten, es nichts in der Theorie gibt, das es ermöglichen würde, Systeme einzuführen, die einen definiten Ort haben. Selbst wenn man einen lokalen Beobachter zulässt, würde der Zustand eines solchen Beobachters sehr schnell mit dem Zustand des Quantensystems und den Zuständen der Objekte in der Umgebung verschränkt

werden. Folglich gäbe es keine dynamischen Eigenschaften des Beobachters, die einen definiten Wert haben; insbesondere würde ein solcher Beobachter sich weder an einem definiten Ort befinden noch definite Bewusstseins-Eigenschaften haben – wie dass ihm ein Messgerät ENTWEDER in einem Zustand erscheint, der Spin plus anzeigt, ODER in einem Zustand erscheint, der Spin minus anzeigt. Kurz gesagt: Im Formalismus der Quantenmechanik bedeutet Dekohärenz eine Entwicklung der Wellenfunktion (oder des Zustandsvektors oder der Dichtematrix) in einem hochdimensionalen mathematischen Raum, die zur Unterdrückung der Interferenz-Terme zwischen den überlagerten Korrelationen führt. Die Aufgabe ist dann jedoch, diese Entwicklung der Wellenfunktion in einem mathematischen Raum einzusetzen, um eine Erklärung auszuarbeiten, wieso Beobachtern definite numerische Werte von Eigenschaften erscheinen.

Die einzige in der Literatur verfügbare Lösung dieser Aufgabe basiert auf folgender Idee: Die physikalische Bedeutung des Verschwindens der Interferenz-Terme besteht darin, dass Dekohärenz zu einer Aufspaltung des Universums in viele Zweige führt, die nicht miteinander interagieren. So gibt es einen Zweig des Universums, in dem das Elektron den Wert Spin plus hat, das Messgerät Spin plus anzeigt und der Beobachter in einem Bewusstseinszustand ist, in dem ihm das Messgerät so erscheint, dass es Spin plus anzeigt; und es gibt einan anderen Zweig des Universums, in dem dasselbe Elektron den Wert Spin minus hat, dasselbe Messgerät Spin minus anzeigt und derselbe Beobachter in einem Bewusstseinszustand ist, in dem ihm das Messgerät so erscheint, dass es Spin minus anzeigt. Da es viele Messungen gibt, die unendlich viele mögliche Messergebnisse haben – Ortsmessungen sind ein Beispiel –, ist diese Position darauf festgelegt zu vertreten, dass Dekohärenz zu einer Aufspaltung des Universums in unendlich viele Zweige führt. Diese Sicht ist als die Viele-Welten-Interpretation der Quantenmechanik bekannt, die auf Everett (1957) zurückgeht (siehe die Arbeiten in Saunders et al. 2010 zur aktuellen Diskussion).

Nach der Aufspaltung ist das Universum demnach eine physikalische Struktur, die aus Objekten besteht, welche viele Male in Zweigen des Universums verdoppelt sind und deren dynamische Eigenschaften definite Werte haben, die sowohl innerhalb eines Zweiges als auch zwischen den Zweigen miteinander korreliert sind (so ist zum Beispiel der definite Wert Spin plus des Elektrons in einem Zweig mit dem definiten Wert Spin minus desselben Elektrons in einem anderen Zweig korreliert). Es gibt keine intrinsische Identität von Objekten in einem Zweig, da die Werte ihrer Eigenschaften in einem Zweig sowohl von den Werten der Eigenschaften anderer Objekte in diesem Zweig als auch von den Werten derselben Eigenschaften in anderen Zweigen abhängen.

Dieser Vorschlag ist jedoch zumindest in zwei zentralen Hinsichten unterentwickelt. Die erste Hinsicht betrifft die Fragen, wann die Aufspaltung erfolgt, wie sie erfolgt und was sie umfasst: Dekohärenz ist ein kontinuierlicher Prozess, während die Aufspaltung des Universums instantan erfolgen soll. Die Aufspaltung betrifft alle Objekte, führt also zu vielfachen Verdoppelungen von



deren Masse, Ladung usw.; es ist jedoch völlig unklar, wie eine solche Vervielfachung von Erhaltungsgrößen erfolgen könnte. Ferner ist unklar, ob die Aufspaltung auch die Raumzeit umfasst; wenn nicht, würden kontradiktorische Prädikate auf ein und dieselbe Region der Raumzeit zutreffen – in ein und derselben Region gäbe es ein Messgerät, das Spin plus anzeigt, und dasselbe Messgerät als Spin minus anzeigend; wenn die Aufspaltung auch die Raumzeit betrifft, ist es unklar, wie sich die Raumzeit vervielfachen könnte, so dass infolge von Dekohärenz viele, miteinander überlagerte Raumzeiten existieren. Des Weiteren ist unklar, wie diese Position das Prinzip der Gleichberechtigung aller Bezugssysteme (Lorentz-Invarianz) der speziellen Relativitätstheorie anerkennen könnte; denn die Aufspaltung betrifft *instantan* die gesamte Raumzeit und setzt folglich offenbar eine objektive Gleichzeitigkeit und damit ein global bevorzugtes Bezugssystem voraus (siehe Barrett 1999, S. 159-160).

Die zweite Hinsicht, in der dieser Vorschlag unterentwickelt ist, betrifft die Situation vor der Aufspaltung des Universums. Da die Aufspaltung ein realer physikalischer Prozess ist, ist es sinnvoll, nach dessen Ursache zu fragen. Die einzig verfügbare Antwort innerhalb der Viele-Welten-Interpretation besteht darin zu sagen, dass der verschränkte Zustand des Universums vor der Aufspaltung eine kausale Struktur ist, welche die Kraft oder die Disposition enthält, durch Dekohärenz eine Aufspaltung des Universums in viele Zweige hervorzubringen. Es wird uns jedoch nichts über die raumzeitliche Beschaffenheit des verschränkten Zustands vor der Aufspaltung gesagt: Besteht dieser Zustand aus Objekten, die in der Raumzeit verschmiert sind und die anlässlich von Dekohärenz sich so aufspalten, dass sie jeweils einen der definiten numerischen Werte ihrer dynamischen Eigenschaften in einem Zweig des Universums haben? Wenn dieser Zustand nicht in der Zeit ist (wie zum Beispiel Kiefer 2007, Kap. 10, aufgrund der zeitlosen Wheeler-DeWitt-Gleichung in der Quantengravitation vertritt), wie bringt es dieser Zustand fertig, eine vierdimensionale Raumzeit mit in dieser lokalisierten Objekten zu erzeugen und wie schafft er es, dabei unendlich viele Kopien dieser Raumzeit herzustellen?

Angesichts dieser offenen Fragen muss man wohl feststellen, dass es einen Formalismus gibt, der anzeigt, wie Interferenz-Terme in der Entwicklung von Wellenfunktionen in einem hochdimensionalen mathematischen Raum verschwinden, aber keine klare und präzise ausgearbeitete Antwort auf die Frage, was die physikalische Bedeutung dieses Formalismus ist und wie man von diesem Formalismus aus zu einer Beschreibung von Beobachtern gelangt, die definite Werte von Eigenschaften wahrnehmen. Solange keine Antwort auf diese Fragen vorliegt, ist es keine Option, das Messproblem durch Fallenlassen von 1C (und damit 1C\*) zu lösen. Dass an dieser Stelle Argumentation erforderlich ist und die Quantenmechanik sich nicht einfach in der Konjunktion von 1A und 1B erschöpft, wird auch an Folgendem deutlich: Der gesamte empirische Erfolg der Quantenmechanik beruht darauf, die Wellenfunktion einzusetzen, um mittels der Born'schen Regel Wahrscheinlichkeiten für Messergebnisse zu berechnen (siehe dazu den Beitrag

von Held, Abschn. 4.2 bis 4.4). Es ist jedoch nicht klar, welchen Stellenwert Wahrscheinlichkeiten in der Viele-Welten-Interpretation haben könnten: Es kann sich nicht um Wahrscheinlichkeiten für Messergebnisse haben, da diese Interpretation 1C zurückweist – Messungen haben keine Ergebnisse. Es ist auch nicht klar, wie es sich um Wahrscheinlichkeiten für die Entscheidungen rationaler Agenten handeln könnte, da jede mögliche Zukunft eines rationalen Agenten mit Sicherheit eintreten wird – für jede mögliche Zukunft von mir gibt es ein zukünftiges Selbst von mir in einem Zweig des Universums, das die betreffende Zukunft durchlebt.

#### **5.4 Zusätzliche Parameter?**

Wenn man an 1C festhält, dann ist man auf Bells folgende berühmte Aussage festgelegt: „Entweder ist die Wellenfunktion, wie sie durch die Schrödinger-Gleichung gegeben ist, nicht alles, oder sie ist nicht richtig“ (Bell 1987, S. 201, Übersetzung M. E.). Wenn man sich die Tatsache vor Augen führt, dass die Wellenfunktion ein mathematisches Objekt ist und dass sie als solche uns nicht sagt, was in der physikalischen Welt sie repräsentiert, dann mag man geneigt sein, die Behauptung 1A aufzugeben und zu vertreten, dass die Wellenfunktion „nicht alles ist“: Sie enthält nicht die Beschreibung von allem, was es in der physikalischen Welt gibt. Seit nunmehr fünf Jahrzehnten steht uns eine präzise ausgearbeitete Theorie zur Verfügung, die auf dieser Idee basiert, nämlich Bohms Quantenmechanik (Bohm 1952, Bohm und Hiley 1993). Bohms Theorie geht von der trivialen Tatsache aus, dass makroskopische Objekte – wie zum Beispiel Messgeräte – sich nur dann an einem bestimmten Ort befinden, wenn auch die mikroskopischen Objekte, aus denen sie zusammengesetzt sind, einen definiten Ort haben. Bohm zieht hieraus den – umstrittenen – Schluss, dass jene mikroskopischen Objekte einen definiten Ortswert nur dann haben können, wenn sie einen solchen immer haben. Mit anderen Worten, Bohms Theorie führt einen definiten Wert des Ortes für jedes physikalische System als einen zusätzlichen Parameter ein, der nicht durch die Wellenfunktion spezifiziert ist. Dieser Parameter ist im Falle mikroskopischer Systeme in dem Sinne verborgen, dass es nicht möglich ist, den Ort solcher Systeme exakt zu bestimmen, ohne diese zu verändern. Auf dieser Grundlage haben die Wahrscheinlichkeiten der Quantenmechanik den gleichen Status wie die Wahrscheinlichkeiten der statistischen Mechanik: Sie drücken das Wissen aus, das wir – gegeben unsere Unkenntnis der exakten Anfangsbedingungen – erreichen können. Bohms Theorie wird durch keines der Theoreme angegriffen, die verborgene Parameter ausschließen sollen (Gleason 1957, Bell 1964 / 1987, Kap. 2, Kochen und Specker 1967); John Bell, der das wichtigste dieser Theoreme bewiesen hat, war über Jahrzehnte neben Bohm selbst der bedeutendste Proponent der Bohm'schen Mechanik.

Obwohl die vorherrschende Version von Bohms Theorie in Begriffen von Teilchen formuliert ist, ist es im Prinzip möglich, eine Bohmsche Quantenfeldtheorie zu entwickeln (siehe zum Beispiel

Bell 1987, Kap. 19). Bohms Theorie ist nicht-lokal: Die Weise, wie sich der Ort eines Teilchens entwickelt, seine Bahn in Raum und Zeit, hängt letztlich von dem Ort aller anderen Teilchen im Universum ab. Aber es ist nicht erforderlich, diese Nicht-Lokalität im Sinne einer Newton'schen Fernwirkung auszuformulieren. Das Quantenpotential, das Bohm einführt und das in einem solchen Sinne verstanden werden kann, kann man ohne Verlust aus der Ontologie der Bohmschen Mechanik streichen (siehe Goldstein 2006, Abschn. 5 und 15, vorletzter Paragraph).

Der oben skizzierte generelle Rahmen für eine Ontologie der Quantenmechanik im Sinne eines (kausalen) ontischen Strukturrealismus kann diesen Sachverhalt verdeutlichen: Dieser Rahmen bietet eine präzise Ausbuchstabierung des Holismus, den Bohm für seine Theorie in Anspruch nimmt und durch den er diese von der klassischen Physik abgrenzt (siehe zum Beispiel den Titel von Bohm und Hiley 1993). Obwohl Bohm'sche Teilchen sich durch ihren Ort voneinander unterscheiden (keine zwei Teilchen können den gleichen Ortswert zur gleichen Zeit haben), handelt es sich dabei um keine intrinsische Identität, da der Ort der Teilchen eine relationale Eigenschaft ist: Der Ortswert eines Teilchens zu einer Zeit ist eine Relation, deren Relata letztlich die Ortswerte aller anderen Teilchen im Universum zur selben Zeit sind. Anders ausgedrückt: Die Ontologie der Bohm'schen Mechanik besteht in einer Struktur von Objekten, deren Ortswerte miteinander korreliert sind. Diese Struktur als Ganze ist kausal in dem Sinne, dass die Struktur des Universums zu einer gegebenen Zeit als Ganze die Kraft oder Disposition enthält, sich in einer bestimmten Weise in der Zeit zu entwickeln. Diese Kraft oder Disposition wird durch ein Bewegungsgesetz ausgedrückt (siehe dazu Dürr et al. 1997, insbesondere S. 33-37). Deshalb hängt die Entwicklung des Ortes eines gegebenen Teilchens (seine Bahn) letztlich von der Weise ab, wie sich der Ort aller anderen Teilchen entwickelt. Wenn man die Grundannahmen der Bohmschen Mechanik so ausbuchstabiert, ist es offensichtlich, dass keinerlei Anlass dafür besteht, ein Quantenpotential (oder eine Führungswelle) einzuführen, das die Teilchen steuert.

Es ist allerdings offensichtlich, dass Bohms Quantentheorie eine globale zeitliche Ordnung aller Ereignisse im Universum voraussetzt (siehe Albert 1992, S. 155-161, für eine überzeugende Illustration dieses Sachverhalts), jedoch unklar, einen wie starken Einwand gegen Bohms Theorie das Fehlen der Lorentz-Invarianz darstellt. Wie oben ausgeführt wurde, beweist Bells Theorem, dass gemäß der Quantentheorie Faktoren, die von einem gegebenen Punkt der Raumzeit durch einen raumartigen Abstand getrennt sind, dennoch dazu beitragen festzulegen, was an diesem Punkt geschieht. Die Frage kann daher nur sein, ob es trotz dieser Nicht-Lokalität der Quantentheorie möglich ist, eine Lorentz-invariante Interpretation dieser Theorie zu formulieren. Man mag dieser Einschätzung durch den Hinweis darauf widersprechen, dass es eine relativistische Quantentheorie gibt, nämlich die Quantenfeldtheorie. Aber selbstverständlich hängen auch in der Quantenfeldtheorie die Wahrscheinlichkeiten für Messergebnisse an einem gegebenen Punkt oder einer Region der Raumzeit davon ab, was an Punkten oder in Regionen der

Raumzeit der Fall ist, die von dem betreffenden Punkt oder der Region durch einen raumartigen Abstand getrennt sind. Was die Forderung nach einer Lorentz-invarianten Theorie dieser Korrelationen betrifft, steht die Quantenfeldtheorie nicht besser da als die nicht-relativistische Quantenmechanik. Die entscheidende Frage für die Beurteilung von Bohms Quantentheorie ist daher, ob man etwas Besseres erreichen kann: Ist es möglich, eine vollständige und präzise Antwort auf die Frage zu geben, was uns die Quantentheorie über die physikalische Welt sagt, ohne zusätzliche Parameter einzuführen und ohne die Lorentz-Invarianz der speziellen Relativitätstheorie aufzugeben?

## **5.5 Von der Lehrbuch-Darstellung zu einer Interpretation der Quantenmechanik?**

In den Lehrbüchern zur Quantenmechanik seit von Neumann (1932) wird diese Theorie in Form zweier radikal verschiedener Dynamiken dargestellt: Wenn keine Messung stattfindet, benutzt man eine lineare dynamische Gleichung wie die Schrödinger-Gleichung. Wenn jedoch eine Messung stattfindet, dann, so die Lehrbuchmeinung, kollabiert die Wellenfunktion und das Quantensystem wird so dargestellt, dass es einen bestimmten Wert der gemessenen Eigenschaft hat – wie zum Beispiel Spin plus (und nicht Spin minus), oder, generell, einen bestimmten Ort. Nehmen wir die Lehrbuchdarstellungen der Quantenmechanik wörtlich und weisen wir somit die Behauptung 1B zurück: Die Wellenfunktion bietet eine vollständige Beschreibung der Eigenschaften von Quantensystemen, aber in bestimmten Situationen verändert sich der Zustand von Quantensystemen derart, dass diese einen bestimmten Ortswert erwerben. Diese Veränderung wird durch den Kollaps der Wellenfunktion dargestellt. Ist es möglich, diese Idee zu präzisieren, so dass man angibt, unter welchen Umständen genau und wie diese Veränderung erfolgt?

Die einzige physikalisch präzise ausgearbeitete Antwort auf diese Frage geht auf die italienischen Physiker Ghirardi, Rimini und Weber (1986) zurück (GRW). GRW ergänzen die Schrödinger-Gleichung um einen stochastischen Term, so dass, kurz gesagt, für ein einzelnes mikroskopisches Quantensystem eine sehr geringe objektive Wahrscheinlichkeit besteht, spontan einen definiten Ortswert anzunehmen. Wenn man jedoch ein makroskopisches System betrachtet, das aus einer enormen Anzahl mikroskopischer Quantensysteme zusammengesetzt ist, dann wird in weniger als einem Bruchteil einer Sekunde mindestens eines dieser Systeme einen definiten Ortswert annehmen, so dass aufgrund der Zustandsverschränkungen alle diese mikroskopischen Systeme – und damit das makroskopische System insgesamt – einen definiten Ortswert haben. GRW formulieren eine präzise Dynamik für den Übergang von Quantensystemen in verschränkten Zuständen zu Quantensystemen mit klassischen Eigenschaften (definiten Ortswert), welche die uns bekannten makroskopischen Systeme aufbauen, und zwar ohne auf den Begriff der Messung angewiesen zu sein.

Die GRW-Gleichung legt jedoch nur eine Dynamik vor, welche die beiden radikal verschiedenen Dynamiken in den Lehrbuchdarstellungen der Quantenmechanik in eine einheitliche Dynamik überführt. Die Aufgabe der Interpretation dieser Theorie ist, auszubuchstabieren, was diese Gleichung über die physikalische Welt aussagt. Wenn man die Lehrbuchdarstellungen der Quantenmechanik wörtlich nimmt, muss man sagen, dass ein Quantensystem (etwa ein Elektron), wenn es keinen definiten Ortswert hat, im Raum verschmiert ist. Ghirardi selbst interpretiert seine Theorie in dieser Weise (Ghirardi et al. 1995): Die Masse eines Elektrons, wenn dieses keinen definiten Ortswert hat, ist wörtlich verstanden im physikalischen Raum verschmiert, so dass sich ein Feld von Massendichte ergibt. Die Welt besteht so gesehen in einer Struktur von Objekten mit verschmierten Werten ihrer dynamischen Eigenschaften, die miteinander korreliert sind. Diese Struktur enthält die Kraft oder Disposition, sich unter bestimmten Umständen zu miteinander korrelierten definiten Werten zu entwickeln (siehe dazu Dorato und Esfeld 2010).

Die GRW-Massendichte-Ontologie ist nicht Lorentz-invariante. Aber diesen Nachteil teilt sie mit Bohms Theorie und der Viele-Welten-Hypothese. Das schwerwiegendste Problem für eine solche »Massendichte-Ontologie« ist, dass die Idee einer verschmierten Massendichte, die sich auf mehr oder weniger einen Punkt zusammenzieht, nicht konsistent ausgeführt werden kann: Die Massendichte kann sich zwar so entwickeln, dass sie größtenteils um einen Punkt herum konzentriert ist, aber sie verschwindet nie in anderen Regionen des Raumes. Erwägen wir, was das für die Messung des Spin eines Elektrons bedeutet, in der die Ergebnisse Spin plus und Spin minus gleich wahrscheinlich sind: Die GRW-Ergänzung der Schrödinger-Gleichung erreicht, dass am Ende der Messung der Spin des Elektrons um einen dieser beiden Werte herum konzentriert ist – sagen wir Spin plus; aber der Wert Spin minus ist immer auch noch da, wenn auch so zu sagen nur in einer kleinen Konzentration. Folglich ist die Massendichte, aus der das Messgerät besteht, weitgehend so geformt, dass das Messgerät Spin plus anzeigt; aber es besteht auch eine kleine Massendichte, die so geformt ist, dass das Messgerät Spin minus anzeigt. Man kann dieses Problem nicht auflösen, indem man von Vagheit redet: Die kleine Massendichte, die so geformt ist, dass das Messgerät Spin minus anzeigt hat dieselben strukturellen und funktionalen Eigenschaften wie die große Massendichte, die so geformt ist, dass das Messgerät Spin plus anzeigt. Wenn die eine wirklich ist, ist es auch die andere – wie klein auch immer die andere sein oder mit der Zeit werden mag (siehe zum Beispiel Maudlin 2010, S. 134-139). Folglich treffen wiederum kontradiktorische Prädikate auf ein und dieselbe Region der Raumzeit zu. Das aber bedeutet, dass es unmöglich ist, die Lehrbuch-Darstellungen der Quantenmechanik wörtlich zu verstehen: Es besteht keine Aussicht, die Idee einer Dynamik präzise auszuführen, welche von verschmierten Werten dynamischer Eigenschaften zu definiten Werten führt.

Es ist jedoch auch eine andere Lesart der GRW-Dynamik möglich, welche die Idee verschmierter Werte physikalischer Eigenschaften (und damit die Massendichte-Ontologie) fallen lässt. Diese Lesart geht auf Bell (1987, S. 205) zurück. Man kann sie am besten über einen Vergleich mit Bohms Quantentheorie verstehen: Bohm zufolge haben Quantensysteme *immer* einen definiten Ort, und dieser definite Ortswert wird in der Beschreibung durch die Wellenfunktion nicht berücksichtigt. In der so genannten GRW-Blitztheorie (GRW flash theory) haben Quantensysteme *nur* dann einen definiten Ortswert, wenn ihre Wellenfunktion gemäß der GRW-Modifikation der Schrödinger-Gleichung eine spontane Lokalisation durchführt, und diese spärlich auftretenden definiten Ortswerte sind *alles*, was es in der physikalischen Welt gibt. Die spontanen Lokalisationen, welche die GRW-Theorie postuliert, werden hier als Blitze angesehen, die um Raumzeitpunkte herum konzentriert sind. Beginnend mit einer Anfangsverteilung von Blitzen ermöglicht es die Wellenfunktion die Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten weiterer Blitze zu berechnen. Von einem Kollaps der Wellenfunktion zu sprechen ist demnach eine irreführende Redeweise dafür, dass neue Blitze auftreten und wir infolgedessen die Kenntnis dieser neuen Blitze in unserer Berechnung der Wahrscheinlichkeiten zukünftiger Blitze berücksichtigen müssen (siehe Allori et al. 2008 für einen erhellenden Vergleich der Ontologien von Bohm, GRW-Massendichte und GRW-Blitze).

Nichtsdestoweniger ist die GRW-Blitztheorie eine realistische Interpretation der Quantentheorie: Jedem Blitz wohnt eine objektive Wahrscheinlichkeit (Propensität) inne, einen weiteren Blitz hervorzubringen. Diese Verursachung erfolgt über Lücken in der Raumzeit hinweg, die sehr groß sein können. Für jede Darstellung der realen Welt müssen wir von einer sehr großen Anfangsverteilung von Blitzen ausgehen. Diese ist eine kausale Struktur miteinander korrelierter Blitze, welcher die Propensität oder Disposition innewohnt, weitere miteinander korrelierte Blitze hervorzubringen. Diese Struktur ist nicht-lokal in dem Sinne, dass man bei der Berechnung der Wahrscheinlichkeiten für weitere Blitze auch Blitze berücksichtigen muss, die durch einen raumartigen Abstand voneinander getrennt sind. Mit anderen Worten, die Disposition einer gegebenen Verteilung von Blitzen, weitere Blitze zu erzeugen, erstreckt sich über raumartig voneinander getrennte Regionen.

Die GRW-Blitztheorie kann in einer Lorentz-invarianten Weise formuliert werden, da sie die Annahme kontinuierlicher Bahnen von etwas in der Raumzeit aufgibt (wie Bohm'scher Teilchen oder Feldwerte, oder eine Massendichte in Ghirardis Ontologie für GRW) (siehe Tumulka 2006 und Maudlin 2011, Kap. 10). Mehr noch: Gegeben den Stand der Kunst, ist die GRW-Blitztheorie der *einzig*e ausgearbeitete Vorschlag für eine Antwort auf die Frage, was die Quantentheorie (oder die Quantenfeldtheorie) über die Dynamik der Materie in der vierdimensionalen Raumzeit aussagt, von dem zumindest im Ansatz ersichtlich ist, wie er Lorentz-invariant sein kann (im Ansatz, denn die Formulierung von Tumulka 2006 berücksichtigt keine interagierenden Felder). Ferner ist die

GRW-Dynamik – sowohl in der Blitz- als auch in der Massendichte-Version – die einzige Formulierung der Quantenmechanik, die eine indeterministische Dynamik enthält (und darüber hinaus ein fundamentales Naturgesetz, das eine Zeitrichtung auszeichnet).

Die GRW-Blitzontologie ist sparsam, aber sie erklärt, wie makroskopische Objekte aus Quantenobjekten aufgebaut sein können und definite Werte ihrer Eigenschaften haben: Makroskopische Objekte sind, wie Bell (1987, S. 205) es ausdrückt, »Galaxien von Blitzen«. Die Sparsamkeit dieser Ontologie wirft jedoch ein großes Problem auf: Fragen wir uns, womit ein Messgerät interagiert, wenn es so eingerichtet ist, dass es ein Quantensystem (zum Beispiel ein Elektron) messen soll. Gemäß der Blitzontologie gibt es nichts, womit das Messgerät interagieren könnte – kein Teilchen, das in es eintritt, und auch keine Welle und keine Massendichte, die es berührt. Es gibt nur einen einzigen Blitz in dessen Vergangenheits-Lichtkegel. Dieser Blitz hat die Disposition (Propensität), einen weiteren Blitz zu produzieren, und diese Disposition soll durch das Messgerät ausgelöst werden; aber diese Disposition ist keine Welle oder Feld, das sich in der Raumzeit erstreckt, so dass es irgendeine physikalische Entität gäbe, mit der das Messgerät interagieren könnte (es sei denn, man wollte sagen, dass das Messgerät direkt und zeitlich rückwärtsgerichtet mit dem Blitz in dessen Vergangenheits-Lichtkegel interagiert). Die GRW-Dynamik geht von Folgendem aus: Das Quantensystem, das gemessen werden soll, wird mit der enorm großen Konfiguration von Quantensystemen verbunden, die das Messgerät ist, und wird dadurch mit dieser verschränkt; aber diese Verschränkung besteht nur kurz, weil extrem schnell mindestens eine spontane Lokalisation in dieser enorm großen Konfiguration eintritt. Diese Aussage ergibt jedoch in der GRW-Blitztheorie keinen Sinn, weil es nichts gibt, mit dem das Messgerät verbunden werden könnte.

Die GRW-Blitztheorie hat den großen Vorteil, dass sie in einer Lorentz-invarianten Weise formuliert werden kann. Dieser Vorteil wird durch eine extrem sparsame Ontologie erkaufte: Es gibt nur gelegentlich Blitze an Punkten der Raumzeit. Die Raumzeit mit mehr als diesen Blitzen auszufüllen – wie kontinuierliche Bahnen von Blitzen, die als Teilchen interpretiert werden könnten, oder eine Massendichte-Verteilung, die überall ist und mancherorts in größerer Konzentration als an anderen Stellen – würde die Lorentz-Invarianz zerstören. Aber wenn es nur GRW-Blitze gibt, sieht es so aus, dass die Raumzeit nicht gefüllt genug ist, damit es Mess-Interaktionen von Quantensystemen geben könnte. Kurz gesagt, die GRW-Blitztheorie stellt ein Instrumentarium bereit, um Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten von Blitzen zu berechnen, aber sie ist wohl kaum ein Kandidat für eine vollständige Ontologie der Quantenmechanik.

## 5.6 Bewertung

Alle Positionen, die wir betrachtet haben, unterscheiden sich in der mathematischen Formulierung der Quantenmechanik, und sie schlagen sehr verschiedene Antworten auf die Frage vor, wie die

Welt gemäß der Quantenmechanik beschaffen ist. Ein Universum, das sich immer weiter in viele, nicht miteinander interferierende Zweige aufspaltet, Teilchen mit kontinuierlichen Bahnen in der Raumzeit, verschmierte und sich überschneidende Massedichten sowie Blitze, die gelegentlich an Punkten der Raumzeit auftreten, sind grundlegend verschiedene Weisen, die Welt im Anschluss an die Quantenmechanik zu verstehen. Dennoch fallen alle diese Weisen in den generellen Rahmen eines (kausalen) ontischen Strukturenrealismus, weil sie alle die Nicht-Separabilität der Quantensysteme als das Neue der Quantenphysik ansehen, und sie liefern alle korrekte Voraussagen für die Ergebnisse aller bekannten Experimente.

Dies mag wie eine Situation ontologischer Unterbestimmtheit aussehen. Aber dieser Eindruck täuscht. Die philosophische Aufgabe ist es zunächst, einen generellen ontologischen Rahmen auszuarbeiten, der das naturphilosophisch Neue der Quantenmechanik unter allen ernsthaften Interpretationen auf den Punkt bringt (wie der [kausale] ontische Strukturenrealismus) und dann die ontologischen Festlegungen präzise herauszuarbeiten, die mit den verschiedenen Formulierungen einer Quantentheorie einhergehen. Wenn diese Arbeit getan ist, verschwindet der Eindruck der Unterbestimmtheit rasch, und man kann zufrieden sein, wenn eine Position übrig bleibt, die Bestand haben kann.

Wenn man 1C zurückweist (die Behauptung, dass Messungen definite Ergebnisse haben), liegt keine präzise ausformulierte, vollständige und kohärente Antwort auf die Frage vor, was die physikalische Bedeutung der mathematisch eleganten Theorie von Wellenfunktionen ist, die sich in einem hochdimensionalen mathematischen Raum entwickeln. Wenn man 1B fallenlässt und das Postulat des Kollaps der Wellenfunktion wörtlich nimmt, zeigt die Untersuchung des einzigen physikalisch präzisen Vorschlags in diesem Sinne – der GRW-Massendichte-Ontologie –, dass keinerlei Aussicht besteht, eine Dynamik zu entwickeln, welche von verschmierten zu definiten Werten führt.

Wenn 1C zurückzuweisen und 1B zurückzuweisen in dem Sinne, dass man physikalische Ereignisse von Zustandsreduktionen anerkennt, keine ernsthaften Optionen sind, dann ergibt sich diese Schlussfolgerung: Man gelangt zu definiten Orten irgendwelcher physikalischer Objekte, seien sei makroskopisch oder mikroskopisch, nur dann, wenn man voraussetzt, dass die fundamentalen physikalischen Objekte (welche diese auch sein mögen) immer einen definiten Ortswert haben.<sup>5</sup> Damit bleiben zwei Lösungsmöglichkeiten für das Messproblem übrig: Bohms Theorie und die GRW-Blitztheorie (siehe auch Maudlin 2010). Bohms Theorie erfüllt diese Schlussfolgerung, indem sie 1A aufgibt, die GRW-Blitztheorie, indem sie 1B aufgibt. Aber dieser Unterschied ist nicht wichtig: Man könnte im Prinzip eine Bohmsche Theorie mit Kollaps der Wellenfunktion formulieren und eine GRW-Blitztheorie ohne Kollaps der Wellenfunktion (weil

---

<sup>5</sup>Ich korrigiere damit meine frühere Auffassung, in der ich davon ausgegangen war, dass es möglich ist, das Postulat des Kollaps der Wellenfunktion in eine einheitliche Dynamik der Zeitentwicklung von Quantensystemen zu integrieren, wie es die GRW-Theorie versucht; siehe zum Beispiel Esfeld (2008, Kap. 3.3).



nach dieser Theorie keine Zustandsreduktionen in der Welt stattfinden, es treten nur weitere Blitze auf) (siehe Allori et al. 2008, Abschnitt 7.1 und 7.2). Der entscheidende Punkt ist, kurz gesagt, dieser: Wenn man keine definiten Ortswerte in die physikalische Theorie hineinsteckt, bekommt man auch keine heraus. Die Frage, in deren Beantwortung sich Bohm und Bells GRW-Blitztheorie unterscheiden, ist dann diese: Wie viele Ortswerte muss man in die Theorie hineinstecken – mit anderen Worten, inwieweit muss man die Raumzeit als mit lokalisierten Objekten oder Ereignissen ausgefüllt ansehen –, um eine präzise und vollständige Erklärung definiter Werte als Messergebnisse (und damit definiter Werte der Eigenschaften von makroskopischen Objekten generell) herauszubekommen? Wie es aussieht, können wir zufrieden sein, wenn am Ende überhaupt eine Antwort auf diese Frage übrigbleibt, die mehr ist als eine vage Andeutung einer Theorie, die erfolgreich sein könnte, aber zusammenbricht, sobald man genauer nachfragt.

### **Danksagung**

Ich danke Claus Kiefer, Meinard Kuhlmann, Vincent Lam und Christian Wüthrich für hilfreiche Kommentare zu diesem Text.

## Zitierte Literatur

- Abraham, Ralph und Marsden, Jerrold E. (1980): *Foundations of mechanics*. London: Benjamin-Cummings, 2. Auflage.
- Adler, Stephen L. (2004): *Quantum theory as an emergent phenomenon*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Ainsworth, Peter M. (2010): „What is ontic structural realism?“ *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 41, S. 50-57.
- Albers, Mark, Kiefer, Claus und Reginatto, Marcel (2008): „Measurement analysis and quantum gravity“. *Physical Review D* 78, 064051.
- Albert, David (1992): *Quantum mechanics and experience*. Cambridge (Massachusetts): Harvard University Press.
- Albert, David (2000): *Time and chance*. Cambridge (Massachusetts): Harvard University Press.
- Allori, Valia, Goldstein, Sheldon, Tumulka, Roderich und Zanghì, Nino (2008): „On the common structure of Bohmian mechanics and the Ghirardi-Rimini-Weber theory“. *British Journal for the Philosophy of Science* 59, S. 353-389.
- Anderson, Carl D. (1932): „The apparent existence of easily deflectible positives“. *Science* 76, S. 238-239.
- Anderson, James L. (1967): *Principles of relativity physics*. New York: Academic Press.
- Arnold, Vladimir I. (1997): *Mathematical Methods of Classical Mechanics*. Berlin, New York: Springer.
- Arnold, Vladimir I. (2006): *Ordinary differential equations*. Berlin: Springer.
- Ashtekar, Abhay (1987): „New Hamiltonian formulation for general relativity“. *Physical Review D* 36, S. 1587-1602.
- Baez, John und Munian, Javier P. (1994): *Gauge fields, knots and gravity*. Singapore: World Scientific.
- Bain, Jonathan (2006): „Spacetime structuralism“. In: D. Dieks (Hg.): *The Ontology of Spacetime*. Amsterdam: Elsevier, S. 37-66.
- Baker, David John (2009): „Against field interpretations of quantum field theory“. *British Journal for the Philosophy of Science* 60, S. 585-609.
- Barbour, Julian (2001): *The end of time*. Oxford: Oxford University Press.
- Barbour, Julian (2008): „The nature of time“. <http://www.fqxi.org/community/forum/topic/360>
- Barrett, Jeffrey A. (1999): „The quantum mechanics of minds and worlds“. Oxford: Oxford University Press.
- Barrow, John und Tipler, Frank (1986): *The anthropic cosmological principle*. Oxford: Clarendon

Press.

Bartelborth, Thomas und Scholz, Oliver R. (2002): „Understanding utterances and other actions“. In: G. Grewendorf und G. Meggle (Hgg.): *Speech acts, mind, and social reality. Discussions with John R. Searle*. Dordrecht: Kluwer, S. 165-186.

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

Bartels, Andreas (1996b): „Modern essentialism and the problem of individuation of spacetime points“. *Erkenntnis* 45, S. 25-43.

Bartels, Andreas und Stöckler, Manfred (Hgg.) (2007): *Wissenschaftstheorie. Ein Studienbuch*. Paderborn: Mentis.

Beatty, John (1995): „The evolutionary contingency thesis“. In: G. Wolters und J. Lennox (Hgg.): *Concepts, theories and rationality in the biological sciences*. Pittsburgh: University of Pittsburgh Press, S. 83-97.

Beisbart, Claus (2007): *Handeln begründen: Motivation, Rationalität, Normativität*. Berlin, Münster: Lit Verlag.

Beisbart, Claus (2009): „Can we justifiably assume the cosmological principle in order to break model underdetermination in cosmology?“. *Journal for General Philosophy of Science* 40, S. 175–205.

Beisbart, Claus (2010): „Kants mathematische Antinomie (I): Anfang und räumliche Grenzen der Welt“. In: N. Fischer (Hg.): *Kants Grundlegung einer kritischen Metaphysik*. Hamburg: Meiner, S. 243-263.

Beisbart, Claus und Hartmann, Stephan (Hgg.) (2011): *Probabilities in physics*. Oxford: Oxford University Press.

Bekenstein, Jacob D. (1981): „Universal upper bound on the entropy-to-energy ratio for bounded systems“. *Physical Review D* 23, S. 287-298.

Bell, John S. (1987): *Speakable and unspeakable in quantum mechanics*. Cambridge: Cambridge University Press. Zitiert gemäß 2. Auflage 2004.

Belot, Gordon und Earman, John (1999): „From metaphysics to physics“. In: J. Butterfield und C. Pagonis (Hgg.): *From physics to philosophy*. Cambridge: Cambridge University Press, S. 166-186.

Belot, Gordon und Earman, John (2001): „Pre-socratic quantum gravity“. In: C. Callender und N. Huggett (Hgg.): *Physics meets philosophy at the Planck scale*, Cambridge: Cambridge University Press, S. 213-255.

Berkovitz, Joseph (2008): „On predictions in retro-causal interpretations of quantum mechanics“. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 39, S. 709-735.

Bernoulli, Johann (1976): „Einladung zur Lösung eines neuen Problems“. In: P. Stäckel (Hg.): *Variationsrechnung*. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft, S 3.

Biener, Zvi und Smeenk, Chris (im Erscheinen): „Cotes' queries: Newton's empiricism and

- conceptions of matter“. In A. Janiak und E. Schliesser (Hgg.): *Interpreting Newton*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Bilson-Thompson, Sundance, Hackett, Jonathan, Kauffman, Louis und Smolin, Lee (2008): „Particle identifications from symmetries of braided ribbon network invariants“. <http://arxiv.org/abs/0804.0037>
- Bilson-Thompson, Sundance, Hackett, Jonathan und Kauffman, Louis (2009): „Particle topology, braids, and braided belts“. <http://arxiv.org/abs/0903.1376>
- Bilson-Thompson, Sundance, Markopoulou, Fotini und Smolin, Lee (2007): „Quantum gravity and the standard model“. *Classical and Quantum Gravity* 24, S. 3975.
- Bird, Alexander (2007): *Nature's metaphysics. Laws and properties*. Oxford: Clarendon Press.
- Black, Max (1952): „The identity of indiscernibles“. *Mind* 61, S. 153-164.
- Bohm, Arno (1986): *Quantum mechanics: foundations and applications*. New York: Springer-Verlag.
- Bohm, David (1952): „A suggested interpretation of the quantum theory in terms of ‘hidden’ variables“. *Physical Review* 85, S. 166-193.
- Bohm, David und Hiley, Basil (1993): *The undivided universe. An ontological interpretation of quantum theory*. London: Routledge.
- Bohr, Niels (1913): „On the constitution of atoms and molecules (Part I)“. *Phil.Mag.* 26, S.1-25; Part II. Ebd., S.476-502; Part III. Ebd., S.857-875. Sowie in: *Collected Works*, Vol. II (1981). Amsterdam: North-Holland, S. 161-233.
- Bohr, Niels (1931): *Atomtheorie und Naturbeschreibung: Vier Aufsätze mit einer einleitenden Übersicht*. Berlin: Springer.
- Boltzmann, Ludwig (1877): „Über die Beziehung zwischen dem zweiten Hauptsatze der mechanischen Wärmetheorie und der Wahrscheinlichkeitsrechnung resp. den Sätzen über das Wärmegleichgewicht“. *Wiener Berichte* 76, S. 373-435. Nachgedruckt in: F. Hasenöhl (Hg.): *Wissenschaftliche Abhandlungen*. Leipzig: J. A. Barth 1909, Vol. 2, S. 164-223.
- Bondi, H., Sachs, F. R., van der Burg, G. J. und Metzner, A. W. K. (1962): „Gravitational waves in general relativity“. *Proceedings of the Royal Society London Ser. A* 269, S. 21-48.
- Born, Max (1926a): „Zur Quantenmechanik der Stoßvorgänge“. *Zeitschrift für Physik* 37, S. 863-867.
- Born, Max (1926b): „Quantenmechanik der Stoßvorgänge“. *Zeitschrift für Physik* 38, S. 803-827.
- Bothe, Walter, und Geiger, Hans (1925): „Über das Wesen des Comptoneffekts“. *Zeitschrift für Physik* 32, S. 639.
- Bousso, Raphael (2002): „The holographic principle“. *Reviews of Modern Physics* 74, S. 825-874.
- Boyd, Richard (2002): „Scientific realism“. In: E. N. Zalta (Hg.): *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*. <http://plato.stanford.edu/archives/sum2002/entries/scientific-realism/>

- Brading, Katherine und Brown, Harvey (2004): „Are gauge symmetry transformations observable?“. *British Journal for the Philosophy of Science* 55, S. 645-665.
- Brading, Katherine und Castellani, Elena (Hgg.) (2003): *Symmetries in physics: philosophical reflections*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Bricmont, Jean (1996): „Science of chaos or chaos in science?“. In: P. R. Gross, N. Levitt und M. W. Lewis (Hgg.): *The flight from science and reason*. Annals of the New York Academy of Sciences, Volume 775, New York: The New York Academy of Sciences, S. 131-175.
- Brown, Harvey (1999): „Aspects of objectivity in quantum mechanics“. In: J. Butterfield und C. Pagonis (Hgg.): *From physics to philosophy*. Cambridge: Cambridge University Press, S. 45-70.
- Brown, James Robert (1996): „Illustration and inference“. In: B. S. Baigrie (Hg.): *Picturing knowledge: historical and philosophical problems concerning the use of art in science*. Toronto (Ontario): University of Toronto Press, S. 250-268.
- Brush, Stephen G. (1976): *The kind of motion we call heat*. Amsterdam: North Holland Publishing.
- Bub, Jeffrey (1999): *Interpreting the quantum world*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Butterfield, Jeremy (2005): „Some aspects of modality in classical mechanics“. In: M. Stöltzner und P. Weingartner (Hgg.): *Formale Teleologie und Kausalität in der Physik*. Paderborn: Mentis, S. 160-198..
- Butterfield, Jeremy (2006): „Against pointillisme about geometry“. In: F. Stadler und M. Stöltzner (Hgg.): *Time and history. Proceedings of the 28<sup>th</sup> Ludwig Wittgenstein Symposium*. Frankfurt (Main): Ontos, S. 181-222.
- Butterfield, Jeremy und Isham, Chris (1999): „On the emergence of time in quantum gravity“. In: J. Butterfield (Hg.): *The arguments of time*. Oxford: Oxford University Press, S. 111-168.
- Butterfield, Jeremy und Isham, Chris (2001): „Spacetime and the philosophical challenge of quantum gravity“. In C. Callender und N. Huggett (Hgg.): *Physics meets philosophy at the planck scale*. Cambridge: Cambridge University Press, S. 33-89.
- Cahill, Reginald T. (2005): *Process physics. From information theory to quantum space and matter*. New York: Nova Science Publishers.
- Callender, Craig (2010): „Is time an illusion?“. *Scientific American* Juni, S. 58-65.
- Callender, Craig und Huggett, Nick (2001): „Introduction“. In: C. Callender und N. Huggett (Hgg.): *Physics meets philosophy at the Planck scale*, Cambridge: Cambridge University Press, S. 1-30.
- Campbell, Keith (1990): *Abstract particulars*. Oxford: Blackwell.
- Cao, Tian Yu (2003): „Structural realism and the interpretation of quantum field theory“. *Synthese* 136, S. 3-24.
- Carrier, Martin, (1998): „In defense of psychological laws“. *International Studies in the*

*Philosophy of Science* 12, S. 217-232.

Carrier, Martin, (2008): *Wissenschaftstheorie zur Einführung*. Hamburg: Junius. 2. Auflage.

Carrier, Martin, Howard, Don und Kourany, Janet (Hgg.) (2008): *The challenge of the social and the pressure of practice: Science and values revisited*. Pittsburgh: University of Pittsburgh Press.

Carrier, Martin (2009): *Raum-Zeit*. Berlin: de Gruyter.

Carrier, Martin und Nordmann, Alfred (Hgg.) (2010): *Science in the context of application. Methodological change, conceptual transformation, cultural reorientation*. Dordrecht: Springer.

Cartwright, Nancy (1983): *How the laws of physics lie*. Oxford: Oxford University Press.

Cartwright, Nancy (1989): *Nature's capacities and their measurement*. Oxford: Oxford University Press.

Cercignani, Carlo (1998): *Ludwig Boltzmann. The man who trusted atoms*. Oxford: Oxford University Press.

Chakravartty, Anjan (2007): *A metaphysics for scientific realism: knowing the unobservable*. Cambridge: Cambridge University Press.

Chakravartty, Anjan (2008): „What you don't know can't hurt you: realism and the unconceived“. *Philosophical Studies* 137, S. 149-158.

Chalmers, Alan (2009): *The scientists's atom and the philosopher's stone. How science succeeded and philosophy failed to gain knowledge of atoms*. Dordrecht: Springer.

Chang, Hasok und Cartwright, Nancy (1993): „Causality and realism in the EPR experiment“. *Erkenntnis* 38, S. 169-190.

Clifton, Rob und Halvorson, Hans (2004): „No place for particles in relativistic quantum theories?“ In: J. Butterfield und H. Halvorson (Hgg.): *Rob Clifton: Quantum entanglements. Selected papers*. Oxford: Pxford University Press, S. 225-261.

Cohen-Tannoudji, Claude, Diu, Bernard und Laloë, Frank (1991): *Quantum mechanics: Vol. I*. New York: Wiley 1991, 6. Auflage.

Compton, Arthur H. (1923): „A quantum theory of the scattering of x-rays by light elements“. *Physical Review* 21.5, S. 483-502.

Crane, H. Richard (1948): „The energy and momentum relations in the beta-decay, and the search for the neutrino“. *Reviews of Modern Physics* 20, S. 278-295.

Debs, Talal und Redhead, Michael (2007): *Objectivity, invariance, and convention: symmetry in physical science*. Cambridge (Massachusetts): Harvard University Press.

Deutsch, David (1999): „Quantum theory of probability and decisions“. *Proceedings of the Royal Society of London* A455, S. 3129.

DeWitt, Bryce S. (1967a): „Quantum theory of gravity. I. The canonical theory“. *Physical Review* 160, S. 1113-1148.

- DeWitt, Bryce S. (1967b): „Quantum theory of gravity. II. The manifestly covariant theory“. *Physical Review* 162, S. 1195-1239.
- Dieks, Dennis (1989): „Quantum mechanics without the projection postulate and its realistic interpretation“. *Foundations of Physics* 38, S. 1397-1423.
- Dieks, Dennis (2001): „Space-time relationalism in Newtonian and relativistic physics“. *International Studies in the Philosophy of Science* 15, S. 5-17.
- Dieks, Dennis und Versteegh, Marijn A. M. (2008): „Identical quantum particles and weak discernibility“. *Foundations of Physics* 38, S. 923-934.
- Dirac, Paul A.M. (1927): „The Quantum Theory of the Emission and Absorption of Radiation“. *Proc. Roy. Soc. A* 113, S. 243–265.
- Dirac, Paul A.M. (1928): „The Quantum Theory of the Electron“. Part I: *Proc. Roy. Soc. A* 117, S. 610–624. Part II: *Proc. Roy. Soc. A* 118, S. 351–361.
- DiSalle, Robert (1994): „On dynamics, indiscernibility, and spacetime ontology“. *British Journal for the Philosophy of Science* 45, S. 265-287.
- Dizadji-Bahmani, Foad, Frigg, Roman und Hartmann, Stephan (2010): „Who is afraid of Nagelian reduction?“. *Erkenntnis* 73, S. 393-412.
- Dorato, Mauro (2000): „Substantivalism, relationism and structural spacetime realism“. *Foundations of Physics* 30, S. 1605-1628.
- Dorato, Mauro und Esfeld, Michael (2010): „GRW as an ontology of dispositions“. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 41, S. 41-49.
- Dorato, Mauro und Pauri, Massimo (2006): „Holism and structuralism in classical and quantum general relativity“. In: D. Rickles, S. French und J. Saatsi (Hgg.): *The structural foundation of quantum gravity*. Oxford: Clarendon Press, S. 121-151.
- Dürr, Detlef (2001): *Bohmsche Mechanik als Grundlage der Quantenmechanik*. Berlin: Springer.
- Dürr, Detlef, Goldstein, Sheldon, Münch-Berndl, Karin und Zanghì, Nino (1999): „Hypersurface Bohm-Dirac models“. *Physical Review Letters A* 60, S. 2729-2736.
- Dürr, Detlef, Goldstein, Sheldon und Zanghì, Nino (1992): „Quantum equilibrium and the origin of absolute uncertainty“. *Journal of Statistical Physics* 67, S. 843-907.
- Dürr, Detlef, Goldstein, Sheldon und Zanghì, Nino (1997): „Bohmian mechanics and the meaning of the wave function“. In: R. S. Cohen, M. Horne und J. Stachel (Hgg.): *Experimental metaphysics. Quantum mechanical studies for Abner Shimony. Volume 1*. Dordrecht: Kluwer, S. 25-38.
- Dürr, Detlef, Goldstein, Sheldon und Zanghì, Nino (2004): „Quantum equilibrium and the role of operators as observables in quantum theory“. *Journal of Statistical Physics* 116, S. 959-1055.
- Dürr, Detlef und Teufel, Stefan (2009): *Bohmian mechanics*. Berlin: Springer.

- Earman, John (1989): *World enough and space-time: absolute versus relational theories of space and time*. Cambridge (Massachusetts): MIT Press.
- Earman, John (2002): „Thoroughly modern McTaggart, or what McTaggart would have said if he had read the general theory of relativity“. *Philosophers Imprint* 2.3, S. 1-28.
- Earman, John (2006a): „Two challenges to the requirement of substantive general covariance“. *Synthese* 148, S. 443-468.
- Earman, John (2006b): „The implications of general covariance for the ontology and ideology of spacetime“. In: D. Dieks (Hg.): *The ontology of spacetime*. Amsterdam: Elsevier, S. 3-23.
- Earman, John und Norton, John (1987): „What price spacetime substantivalism? The hole story“. *British Journal for the Philosophy of Science* 38, S. 515-525.
- Earman, John und Redei, Miklós (1996): „Why ergodic theory does not explain the success of equilibrium statistical mechanics“. *British Journal for the Philosophy of Science* 47, S. 63-78.
- Earman, John und Roberts, John (1999): „Ceteris paribus, there are no provisos“. *Synthese* 118, S. 439-478.
- Earman, John, Roberts, John und Smith, Sheldon (2002): „Ceteris paribus lost“. In: J. Earman, C. Glymour, und S. Mitchell (Hgg.): *Ceteris paribus laws*. Dordrecht: Kluwer, S. 281-301.
- Ehlers, Jürgen und Friedrich, Helmut (Hgg.) (1994): *Canonical gravity – from classical to quantum*. Berlin: Springer.
- Ehlers, Jürgen (2007): „General relativity“. *Lecture Notes in Physics* 721, S. 91-104.
- Ehrenfest, Paul und Ehrenfest, Tatiana (1912): *The conceptual foundations of the statistical approach in mechanics*. Nachdruck Mineola (New York): Dover Publications 2002.
- Einstein, Albert (1905): „Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichts betreffenden heuristischen Gesichtspunkt“. *Annalen der Physik* 17, S.132.
- Einstein, Albert (1916): „Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie“. *Annalen der Physik* 49, S. 769-822.
- Einstein, Albert (1917a): „Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie“. In: H. Lorentz, A. Einstein und H. Minkowski (Hgg.) (1923): *Das Relativitätsprinzip. Eine Sammlung von Abhandlungen*. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft, 8. Auflage, S. 130-139.
- Einstein, Albert (1917b): „Zur Quantentheorie der Strahlung“. *Physikalische Zeitschrift* 18, S. 121.
- Einstein, Albert (1918): „Prinzipielles zur allgemeinen Relativitätstheorie“. *Annalen der Physik* 55, S. 241-244.
- Einstein, Albert (1920): *Äther und Relativitätstheorie*. Springer: Berlin.
- Einstein, Albert (1922): *Grundzüge der Relativitätstheorie*. Braunschweig: Vieweg, 5. Auflage 1969.
- Einstein, Albert (1948): „Quanten–Mechanik und Wirklichkeit“. *Dialectica* 2, S. 320-324.
- Einstein, Albert (1956): „Bemerkungen zu den in diesem Bande vereinigten Arbeiten“. In: P. A.



- Schilpp (Hg.): *Albert Einstein als Philosoph und Naturforscher*. Stuttgart: Kohlhammer, S.493-511.
- Eling, Christopher, Guedens, Raf und Jacobson, Ted (2006): „Non-equilibrium thermodynamics of spacetime“. *Physical Review Letters* 96, 121301.
- Ellis, George F. R. (2007): „Issues in the philosophy of cosmology“. In: J. Butterfield und J. Earman (Hgg.): *Philosophy of physics*. Amsterdam: Elsevier, S. 1183-1286.
- Emch, Gérard (2007): „Quantum statistical Physics“. In: J. Butterfield und J. Earman (Hgg.): *Philosophy of physics*. Amsterdam: Elsevier, S. 1075-1182.
- Emch, Gérard und Liu, Chaung (2002): *The logic of thermo-statistical physics*. Berlin: Springer.
- Esfeld, Michael (2002): *Holismus in der Philosophie des Geistes und in der Philosophie der Physik*, Frankfurt (Main): Suhrkamp.
- Esfeld, Michael (2004): „Quantum entanglement and a metaphysics of relations“. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 35, S. 601-617.
- Esfeld, Michael (2008): *Naturphilosophie als Metaphysik der Natur*. Frankfurt (Main): Suhrkamp.
- Esfeld, Michael (2009): „The modal nature of structures in ontic structural realism“. *International Studies in the Philosophy of Science* 23, S. 179-194.
- Esfeld, Michael (2011): *Einführung in die Naturphilosophie*. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft. 2. Auflage.
- Esfeld, Michael und Lam, Vincent (2008): „Moderate structural realism about space-time“. *Synthese* 160, S. 27-46.
- Esfeld, Michael und Lam, Vincent (2011): „Ontic structural realism as a metaphysics of objects“. In: A. und P. Bokulich (Hgg.): *Scientific structuralism*. Dordrecht: Springer, S. 143-159.
- Esfeld, Michael und Sachse, Christian (2010): *Kausale Strukturen. Einheit und Vielfalt in der Natur und den Naturwissenschaften*. Berlin: Suhrkamp.
- Euler, Leonhard (1952): *Methodus inveniendi lineas curvas maximi minive proprietate gaudentes sive solutio problematis isoperimetrici latissimo sensu accepti*. Hg. von C. Carathéodory. Bern: Orell Fussli.
- Evans, Denis J. und Searles, Debra J. (1996): „Causality, response theory, and the second law of thermodynamics“. *Physical Review E* 53.6, S. 5808-5815.
- Everett, Hugh (1957): „‘Relative state’ formulation of quantum mechanics“. *Reviews of Modern Physics* 29, S. 454-462.
- Falkenburg, Brigitte (2000): *Kants Kosmologie. Die wissenschaftliche Revolution der Naturphilosophie im 18. Jahrhundert*. Frankfurt (Main): Klostermann.
- Falkenburg, Brigitte (2004): „Experience and completeness in physical knowledge: variations on a Kantian theme“. In: U. Meixner und A. Newen (Hgg.): *Philosophiegeschichte und Logische*

*Analyse 7, Schwerpunkt: Geschichte der Naturphilosophie*. Paderborn: Mentis, S. 153-176.

Falkenburg, Brigitte (2007): *Particle metaphysics: a critical account of subatomic reality*. Berlin: Springer.

Falkenburg, Brigitte (2010): „Wave-particle duality in quantum optics“. In: M. Suarez, M. Dorato und M. Rédei (Hgg.): *EPSA Philosophical Issues in the Sciences*. Vol. 2. Dordrecht: Springer, S. 31-42.

Falkenburg, Brigitte (2011): „The philosopher of the physicists: The legacy of Erhard Scheibe“. *Journal for General Philosophy of Science* 42, S. 1-15.

Falkenburg, Brigitte (2012): *Mythos Determinismus. Wieviel erklärt uns die Hirnforschung?*. Heidelberg, Berlin: Springer.

Farhi, Edward, Goldstone, Jeffrey und Gutmann, Sam (1989): „How probability arises in quantum mechanics“. *Annals of Physics* 192, S. 368-382.

Fermi, Enrico (1934): „Versuch einer Theorie der  $\beta$ -Strahlen. I“. *Zeitschrift für Physik* 88, S. 161-177.

Fermi, Enrico (1936): *Thermodynamics*. Nachdruck Mineola (New York): Dover Publications 2000.

Feynman, Richard P. (1973): *Vorlesungen über Physik*. München: Oldenbourg.

Field, Hartry (1989): *Realism, mathematics and modality*. Oxford: Blackwell.

Fodor, Jerry A. (1991): „You can fool some people all of the time, everything else being equal; hedged laws and psychological explanations“. *Mind* 100, S. 19-34.

Frank, Philipp (1988): *Das Kausalgesetz und seine Grenzen*. Frankfurt (Main): Suhrkamp.

Franklin, Allan (2004): *Are there really neutrinos? An evidential history*. Boulder (Colorado): Westview Press.

Fraser, Doreen (2008): „The fate of ‘particles’ in quantum field theories with interactions“. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 39, S. 841-859.

French, Steven (1989): „Identity and individuality in classical and quantum physics“. *Australasian Journal of Philosophy* 67, S. 432-446.

French, Steven (2006): „Structure as a weapon of the realist“. *Proceedings of the Aristotelian Society* 106, S. 167-185.

French, Steven und Ladyman, James (2003): „Remodelling structural realism: quantum physics and the metaphysics of structure“. *Synthese* 136, S. 31-56.

Friedman, Michael (1983): *Foundations of space-time theories. Relativistic physics and philosophy of science*. Princeton: Princeton University Press.

Frigg, Roman (2008): „A field guide to recent work on the foundations of statistical mechanics“. In: D. Rickles (Hg.): *The Ashgate companion to contemporary philosophy of physics*. London: Ashgate, S. 99-196.

- Frigg, Roman (2009a): „Probability in Boltzmannian statistical mechanics“. In: G. Ernst und A. Hüttemann (Hgg.): *Time, chance and reduction. Philosophical aspects of statistical mechanics*. Cambridge: Cambridge University Press, S. 92-118.
- Frigg, Roman (2009b) „Typicality and the approach to equilibrium in Boltzmannian statistical mechanics“. *Philosophy of Science* (Supplement) 76, S. 997-1008.
- Frigg, Roman und Hunter, Mathew (Hgg.) (2010): *Beyond mimesis and convention. Representation in art and science*. New York: Springer.
- Frigg, Roman und Werndl, Charlotte (2010): „Explaining thermodynamic-like behaviour in terms of epsilon-ergodicity“. Erscheint in *Philosophy of Science*.
- Frigg, Roman, Hartmann, Stephan und Imbert, Cyrille (Hgg.) ( 2011): *Models and simulation 2. Synthese* 180.1.
- Frisch, Mathias (2005): *Inconsistency, asymmetry, and non-locality: a philosophical investigation of classical electrodynamics*. Oxford: Oxford University Press.
- Frisch, Mathias (2006): „A tale of two arrows“. *Studies in the History and Philosophy of Modern Physics* 37, S. 542-558.
- Frisch, Mathias (2012): „No place for causes? Causal skepticism in physics“. Erscheint in: *European Journal for Philosophy of Science*.
- Ghirardi, GianCarlo, Grassi, Renata und Benatti, Fabio (1995): „Describing the macroscopic world: closing the circle within the dynamical reduction program“. *Foundations of Physics* 25, S. 5-38.
- Ghirardi, GianCarlo, Rimini, Alberto und Weber, Tullio (1986): „Unified dynamics for microscopic and macroscopic objects“. *Physical Review D* 34, S. 470-491.
- Gibbs, J. Wilard (1902): *Elementary principles in statistical mechanics*. Nachdruck Woodbridge: Ox Bow Press 1981.
- Giere, Ronald N. (1996): „Visual models and scientific judgement“. In: B. S. Baigrie (Hg.): *Picturing knowledge: historical and philosophical problems concerning the use of art in science*. Toronto (Ontario): University of Toronto Press, S. 269-302.
- Giles, Robin (1964): *Mathematical foundations of thermodynamics*. Oxford: Pergamon Press.
- Girelli, Florian, Liberati, Stefano und Sindoni, Lorenzo (2008): „On the emergence of time and gravity“. <http://arxiv.org/abs/0806.4239>
- Giulini, Domenico (2007): „Remarks on the notions of general covariance and background independence“. *Lecture Notes in Physics* 721, S. 105-120.
- Giulini, Domenico (im Erscheinen): „Matter from space“. *Einstein Studies* Vol. 12. Basel: Birkhäuser.
- Gleason, A. M. (1957): „Measures on the closed subspaces of a Hilbert space“. *Journal of*

*Mathematics and Mechanics* 6, S. 885-893.

Glimm, James F. und Jaffe, Arthur (1981): *Quantum physics – a functional integral point of view*. Heidelberg: Springer.

Glymour, Clark (1977): „Indistinguishable space-times and the fundamental group“. In: J. Earman, C. Glymour und J. Stachel (Hgg.): *Foundations of space-time theories. Minnesota Studies in the Philosophy of Science*. Minneapolis: University of Minnesota Press, S. 50-60.

Goldstein, Herbert (1980): *Classical mechanics*. Reading (Massachusetts): Addison Wesley.

Goldstein, Sheldon (2001): „Boltzmann’s approach to statistical mechanics“. In: J. Bricmont, D. Dürr, M. C. Galavotti, G. Ghirardi, F. Petruccione und N. Zanghì (Hgg.) (2001): *Chance in physics: foundations and perspectives*. Berlin: Springer, S. 39-54.

Goldstein, Sheldon und Lebowitz, Joel L. (2004): „On the (Boltzmann) entropy of non-equilibrium systems“. *Physica D*, S. 53-66.

Goldstein, Sheldon (2006): „Bohmian mechanics“. In: E. N. Zalta (Hg.): *Stanford Encyclopedia of Philosophy*. <http://plato.stanford.edu/entries/qm-bohm>

Goyal Philip, Knuth, Kevin H. und Skilling, John (2010): „Origin of complex quantum amplitudes and Feynman’s rules“. *Physical Review A* 81, 022109.

Graves, John (1972): „The conceptual foundations of contemporary relativity theory“. Vambridge (Massachusetts): MIT Press.

Griffiths, David (1987): *Introduction to elementary particles*. Hoboken (New Jersey): Wiley.

Griffiths, David (1989): *Introduction to Electrodynamics*. Englewood Cliffs (New Jersey): Prentice-Hall. 2. Auflage.

Griffiths, Robert B. (2002): *Consistent quantum mechanics*. Cambridge: Cambridge University Press.

Haag, Rudolf (1996): *Local quantum physics: fields, particles, algebras*. Berlin: Springer, 2. Auflage.

Hacking, Ian (1983): *Representing and intervening: introductory topics in the philosophy of natural science*. Cambridge: Cambridge University Press.

Hacking, Ian (1996): *Einführung in die Philosophie der Naturwissenschaften*. Übersetzt von Joachim Schulte. Stuttgart: Reclam.

Halzen, Francis und Martin, Alan D. (1984): *Quarks and leptons: an introductory course in modern particle physics*. New York: Wiley.

Hamber, Herbert W. (2009): *Quantum gravitation. The Feynman path integral approach*. Berlin: Springer.

Hardy, Lucien (2001): „Quantum theory from five reasonable axioms“. <http://arxiv.org/abs/quant-ph/0101012>

- Hardy, Lucien (2007): „Quantum gravity computers“. <http://arxiv.org/abs/quant-ph/0701019>
- Hawkins, Eli, Markopoulou, Fotini und Sahlmann, Hanno (2003): „Evolution in quantum causal histories“. <http://arxiv.org/abs/hep-th/0302111>
- Healey, Richard (1989): *The philosophy of quantum mechanics: an interactive interpretation*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Healey, Richard (2001): „On the reality of gauge potentials“. *Philosophy of Science* 68, S. 432-455.
- Healey, Richard (2007): *Gauging what's real*. New York: Oxford University Press.
- Hedrich, Reiner (2006): „String theory – from physics to metaphysics“. *Physics and Philosophy* 005. <http://arxiv.org/abs/physics/0604171>
- Hedrich, Reiner (2007a): *Von der Physik zur Metaphysik – Physikalische Vereinheitlichung und Stringansatz*. Frankfurt (Main): Ontos.
- Hedrich, Reiner (2007b): „The internal and external problems of string theory – a philosophical view“. *Journal for General Philosophy of Science* 38, S. 261-278.
- Hedrich, Reiner (2011a): *Raumzeitkonzeptionen in der Quantengravitation*. <http://arxiv.org/abs/1101.1835>
- Hedrich, Reiner (2011b): „String theory – nomological unification and the epicycles of the quantum field theory paradigm“. <http://arxiv.org/abs/1101.0690>
- Heisenberg, Werner (1925): „Über quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen“. *Zeitschrift für Physik* 33, S. 879–893.
- Heisenberg, Werner (1959): *Physik und Philosophie*. Stuttgart: S. Hirzel.
- Heisenberg, Werner (1969): „Die Quantenmechanik und ein Gespräch mit Einstein (1925-1926)“. In: *Der Teil und das Ganze. Gespräche im Umkreis der Atomphysik*. München: Piper, S. 85-100.
- Held, Carsten (2005): *Frege und das Grundproblem der Semantik*. Paderborn: Mentis.
- Held, Carsten (2008): „Axiomatic quantum mechanics and completeness“. *Foundations of Physics* 38, S. 707-732.
- Hempel, Carl und Oppenheim, Paul (1948): „Studies in the logic of explanation“. Zitiert gemäß C. Hempel: *Aspects of scientific explanation and other essays*. New York: The Free Press 1965, S. 245-290.
- Henneaux, Marc und Teitelboim, Claudio (1992): *Quantization of gauge systems*. Princeton: Princeton University Press.
- Hermann, Armin, von Meyenn, Karl und Weisskopf, Victor F. (Hgg.): (1979): *Wolfgang Pauli. Wissenschaftlicher Briefwechsel*. Heidelberg: Springer.
- Hilbert, David (1900): „Mathematische Probleme“. *Nachrichten von der Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen. Mathematisch-Physikalische Klasse aus dem Jahre 1900*, S. 253-297.

- Hilbert, David (1916): „Die Grundlagen der Physik (Erste Mitteilung)“. *Nachrichten von der Königl. Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen. Mathematisch-Physikalische Klasse aus dem Jahre 1915*, S. 295-407.
- Hilbert, David (1918): „Axiomatisches Denken“. *Mathematische Annalen* 78, S. 405-415.
- Hilbert, David (1964): „Die Grundlagen der Physik“. In: *Hilbertiana – Fünf Aufsätze von David Hilbert*. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft, S. 47-78 (zweite Fassung von Hilbert 1916).
- Hildebrandt, Stefan und Tromba, Anthony (1996): *Kugel, Kreis und Seifenblasen – Optimale Formen in Geometrie und Natur*. Basel: Birkhäuser.
- Hitchcock, Christopher (2007): „What Russell got right“. In: H. Price und R. Corry (Hgg.): *Causality, Physics, and the Constitution of Reality: Russell's Republic Revisited*. Oxford: Oxford University Press, S. 45-65.
- Hofer, Carl (1996): „The metaphysics of space-time substantivalism“. *Journal of Philosophy* 93, S. 5-27.
- Hofer, Carl (1998): „Absolute versus relational spacetime: for better or worse, the debate goes on“. *British Journal for the Philosophy of Science* 49, S. 451-467.
- Holton, Gerald (1973): *Thematic origins of scientific thought*. Cambridge (Massachusetts): Harvard University Press.
- Hu, Bei Lok (2005): „Can spacetime be a condensate?“. *International Journal of Theoretical Physics* 44, S. 1785-1806.
- Hu, Bei Lok (2009): „Emergent quantum gravity“. <http://arxiv.org/abs/0903.0878>
- Hu, Bei Lok und Verdaguer, Enric (2008): „Stochastic gravity“. <http://arxiv.org/abs/0802.0658>
- Huggett, Nick (2000): „Philosophical foundations of quantum field theory“. *British Journal for the Philosophy of Science* 51, S. 617-637.
- Huggett, Nick und Callender, Craig (2001): „Why quantize gravity (or any other field for the matter)?“. *Philosophy of Science* 68, S. S382-S394.
- Hughes, R. I. G. (1989): *The structure and interpretation of quantum mechanics*. Cambridge (Massachusetts): Harvard University Press.
- Hüttemann, Andreas (2004): *What's wrong with microphysicalism?*. London: Routledge.
- Hüttemann, Andreas (2005): „Explanation, emergence, and quantum entanglement“. *Philosophy of Science* 72, S. 114-127.
- Hüttemann, Andreas (2007): „Naturgesetze“. In: A. Bartels und M. Stöckler (Hgg.): *Wissenschaftstheorie. Texte zur Einführung*. Paderborn: Mentis, S. 135-153.
- Hüttemann, Andreas (2010): „Eine dispositionale Theorie der Kausalität“. In: C.F. Gethmann (Hg.): *Lebenswelt und Wissenschaft. Deutsches Jahrbuch Philosophie* 2. Meiner: Hamburg, S. 451-467.

Hüttemann, Andreas, Reutlinger, Alexander und Schurz, Gerhard (2011): „Ceteris paribus laws“. In: E. N. Zalta (Hg.): *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*. <http://plato.stanford.edu/entries/ceteris-paribus/>

Isham, Christopher J. (1987): „Quantum gravity“. In: M. A. H. MacCallum (Hg.): *General relativity and gravitation*. Cambridge: Cambridge University Press, S. 99-129.

Jackson, John D. (1999): *Classical electrodynamics*. New York: Wiley, 3. Auflage.

Jacobson, Edward (1995): „Thermodynamics of spacetime“. *Physical Review Letters* 75, S. 1260-1263.

Jensen, Carsten (2000): *Controversy and consensus: nuclear beta decay 1911-1934*. Basel: Birkhäuser.

Joos, Erich, Zeh, H.-Dieter, Kiefer, Claus, Giulini, Domenico, Kupsch, Joachim und Stamatescu, Ion-Olimpiu (Hgg.) (2003): *Decoherence and the appearance of a classical world in quantum theory*. Berlin: Springer, 2. Auflage.

Kaiser, David (2005): *Drawing theories apart: the dispersion of Feynman diagrams in postwar physics*. Chicago: University of Chicago Press.

Kaku, Michio (1999): *Introduction to superstrings and M-theory*. New York: Springer, 2. Auflage.

Kanitscheider, Bernulf (1991): *Kosmologie. Geschichte und Systematik in philosophischer Perspektive*. Stuttgart: Reclam.

Kant, Immanuel (1781/87): *Kritik der reinen Vernunft*. Akademie-Ausgabe, hg v. d. Preußischen Akademie der Wissenschaften 1902ff.

Kant, Immanuel (1790): *Kritik der Urteilskraft*. Akademie-Ausgabe, hg v. d. Preußischen Akademie der Wissenschaften 1902ff.

Kantorovich, Aharon (2009): „Ontic structuralism and the symmetries of particle physics“. *Journal for General Philosophy of Science* 40, S. 73-84.

Kaplunovsky, Vadim und Weinstein, Marvin (1985): „Space-time: arena or illusion?“. *Physical Review D* 31, S. 1879-1898.

Kiefer, Claus (1990): „Der Zeitbegriff in der Quantengravitation“. *Philosophia naturalis* 27, S. 43-65.

Kiefer, Claus (2007): *Quantum gravity*. Oxford: Oxford University Press. 2. Auflage.

Kiefer, Claus (2008a): „Does time exist in quantum gravity?“. [www.fqxi.org/community/forum/topic/265](http://www.fqxi.org/community/forum/topic/265)

Kiefer, Claus (2008b): *Der Quantenkosmos – von der zeitlosen Welt zum expandierenden Universum*. Frankfurt (Main): S. Fischer.

- Kiefer, Claus (2009): *Der Quantenkosmos*. Frankfurt (Main): Fischer, 3. Auflage.
- Klein, Martin J. (1973): „The development of Boltzmann’s statistical ideas“. In: D. Cohen und W. Thirring (Hgg.): *The Boltzmann equation: theory and applications*. Wien: Springer, S. 53-106.
- Kochen, Simon (1985): „A new interpretation of quantum mechanics“. In: P. Mittelstaedt und P. Lahti (Hgg.): *Symposium on the foundations of modern physics 1985*. Singapore: World Scientific, S. 151-169.
- Kochen, Simon und Specker, Ernst (1967): „The problem of hidden variables in quantum mechanics“. *Journal of Mathematics and Mechanics* 17, S. 59-87.
- Kocsis, Sacha, Braverman, Boris, Ravets, Sylvain et al. (2011): „Observing the average trajectories of single photons in a two-slit interferometer“. *Science* 332, S.1170-1173.
- Kragh, Helge (2000): *Cosmology and controversy. The historical development of two theories of the universe*. Princeton: Princeton University Press.
- Kragh, Helge (2007): *Conceptions of cosmos. From myths to the accelerating universe: a history of cosmology*. Oxford: Oxford University Press.
- Kribs, David W. und Markopoulou, Fotini (2005): „Geometry from quantum particles“. <http://arxiv.org/abs/gr-qc/0510052>
- Kuhlmann, Meinard (2001): „Formal aspects of the particle concept“. In: T. Gonis und P. E. A. Turchi (Hgg.): *Decoherence and its implications in quantum computation and information transfer*. Amsterdam: IOS Press, S. 83-97.
- Kuhlmann, Meinard (2010a): *The ultimate constituents of the material world. In search of an ontology for fundamental physics*. Frankfurt (Main): Ontos.
- Kuhlmann, Meinard (2010b): „Why conceptual rigour matters to philosophy: on the ontological significance of algebraic quantum field theory“. *Foundations of Physics* 40, S. 1625-1637.
- Kuhlmann, Meinard (2011): „Quantum field theory“. In: E. N. Zalta (Hg.): *Stanford Encyclopedia of Philosophy*. <http://plato.stanford.edu/entries/quantum-field-theory/>
- Ladyman, James (1998): „What is structural realism?“. *Studies in the History and Philosophy of Science* 29, S. 409-424.
- Ladyman, James (2007): „On the identity and diversity of objects in a structure“. *Proceedings of the Aristotelian Society Supplement* 81, S. 23-43.
- Ladyman, James und Bigaj, Tomasz (2010): „The principle of the identity of indiscernibles and quantum mechanics“. *Philosophy of Science* 77, S. 117-136.
- Ladyman, James und Ross, Don mit Spurrett, David und Collier, John (2007): *Every thing must go. Metaphysics naturalised*. Oxford: Oxford University Press.
- Landau, Lev D. und Lifschitz, Evgeny M. (1979): *Lehrbuch der theoretischen Physik, Band III: Quantenmechanik*. Berlin: Akademie-Verlag.



- Landsman, N. P. (1998): „Simple new axioms for quantum mechanics“. *International Journal for Theoretical Physics* 37, S. 343-348.
- Lange, Marc (1993): „Natural laws and the problem of provisos“. *Erkenntnis* 38, S. 233-248.
- Lasswitz, Kurd (1890): *Geschichte der Atomistik vom Mittelalter bis Newton*. Nachdruck in 2 Bänden, Hildesheim 1963: Olms.
- Lavis, David (2005): „Boltzmann and Gibbs: an attempted reconciliation“. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 36, S. 245-273.
- Lavis, David und Milligan, Peter (1985): „Essay review of Jaynes' collected papers“. *British Journal for the Philosophy of Science* 36, S. 193-210.
- Lebowitz, Joel L. (1993a): „Boltzmann's entropy and time's arrow“. *Physics Today*, September Issue, S. 32-38.
- Lebowitz, Joel L. (1993b): „Macroscopic laws, microscopic dynamics, time's arrow and Boltzmann's entropy“. *Physica A* 194, S. 1-27.
- Lebowitz, Joel L. (1999): „Statistical mechanics: a selective review of two central issues“. *Reviews of Modern Physics* 71, S. 346-357.
- Lehmkuhl, Dennis (2011): „Mass-energy-momentum. Only there because of spacetime?“. *British Journal for the Philosophy of Science*.
- Leibniz, Gottfried Wilhelm (1890): *Die philosophischen Schriften*. Hg. von G. J. Gerhardt, Nachdruck Hildesheim: Olms 1961.
- Lemons, Don S. (1997): *Perfect form. Variational principles, methods, and applications in elementary physics*. Princeton: Princeton University Press.
- Lewis, David (1986): *On the plurality of worlds*. Oxford: Blackwell.
- Lewis, David (2009): „Ramseyan humility“. In: D. Braddon-Mitchell und R. Nola (Hgg.): *Conceptual analysis and philosophical naturalism*. Cambridge (Massachusetts): MIT Press, S. 203-222.
- Lipton, Peter (1999): „All else being equal“. *Philosophy* 74, S. 155-168.
- Livine, Etera R. und Terno, Daniel R. (2007): „Quantum causal histories in the light of quantum information“. *Physical Review D* 75, 084001.
- Lloyd, Seth (2005): „A theory of quantum gravity based on quantum computation“. <http://arxiv.org/abs/quant-ph/0501135>
- Lowe, E. Jonathan (1998): *The possibility of metaphysics – substance, identity, and time*. Oxford: Clarendon Press.
- Ludwig, Günther (1953): „Der Meßprozeß“. *Zeitschrift für Physik* 135, S. 483-511.
- Lyre, Holger (2004a): *Lokale Symmetrien und Wirklichkeit*. Paderborn: Mentis.
- Lyre, Holger (2004b): „Holism and structuralism in U(1) gauge theory“. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 35, S. 643-670.

- Lyre, Holger (2005): „Metaphysik im ‘Handumdrehen’: Kant und Earman, Parität und Raumauffassung“. *Philosophia Naturalis* 42, S. 49-76.
- Lyre, Holger (2008): „Does the Higgs mechanism exist?“ *International Studies in the Philosophy of Science* 22, S. 119-133.
- Lyre, Holger (2010): „Humean perspectives on structural realism“. In: F. Stadler (Hg.): *The present situation in the philosophy of science*. Dordrecht: Springer, S. 381-397.
- Lyre, Holger (2011a): „Is structural underdetermination possible?“ *Synthese* 180.2, S. 235-247.
- Lyre, Holger (2011b): „Structural invariants, structural kinds, structural laws“. In: D. Dieks, W. Gonzalez, S. Hartmann, M. Stöltzner und M. Weber (Hgg.): *Probabilities, laws, and structures*. Dordrecht: Springer, S. 179-191.
- Lyre, Holger und Eynck, Tim (2003): „Curve it, Gauge it, or leave it? Underdetermination in gravitational theories“. *Journal for General Philosophy of Science* 34, S. 277-303.
- Mach, Ernst (1883/1988): *Die Mechanik in ihrer Entwicklung. Historisch-kritisch dargestellt*. Leipzig: Brockhaus 9. Auflage 1933.
- Mach, Ernst (1991): *Erkenntnis und Irrtum. Skizzen zur Psychologie der Forschung*. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft.
- Mainzer, Klaus (1988): *Symmetrien der Natur*. Berlin: de Gruyter.
- Malament, David (1977): „Observationally indistinguishable space-times“. In: J. Earman, C. Glymour und J. Stachel (Hgg.): *Foundations of space-time theories. Minnesota Studies in the Philosophy of Science*. Minneapolis: University of Minnesota Press, S. 61-80.
- Malament, David (1982): „Review of Field’s Science without numbers“. *Journal of Philosophy* 79, S. 523-534.
- Malament, David (1996): „In defense of dogma: why there cannot be a relativistic quantum mechanics of (localizable) particles“. In R. Clifton (Hg.): *Perspectives on quantum reality: non-relativistic, relativistic, and field-theoretic*. Dordrecht: Kluwer, S. 1-10.
- Maldacena, Juan (2007): „The illusion of gravity“. *Scientific American Reports* April, S. 75-81.
- Malzkorn, Wolfgang (1999): *Kants Kosmologie-Kritik. Eine formale Analyse der Antinomienlehre*. Berlin: de Gruyter.
- Manchak, John B. (2009): „Can we know the global structure of spacetime?“ *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 40, S. 53-56.
- Mansfeld, Jaap (Hg.) (1987): *Die Vorsokratiker, griechisch/deutsch*. Stuttgart: Reclam.
- Markopoulou, Fotini (2000a): „Quantum causal histories“. *Classical and Quantum Gravity* 17, S. 2059-2072.
- Markopoulou, Fotini (2000b): „An insider’s guide to quantum causal histories“. *Nuclear Physics* 88 (Proc. Suppl.), S. 308-313.

- Markopoulou, Fotini (2007): „New directions in background independent quantum gravity“. <http://arxiv.org/abs/gr-qc/0703097>
- Markopoulou, Fotini und Smolin, Lee (1999): „Holography in a quantum spacetime“. <http://arxiv.org/abs/hep-th/9910146>
- Marmo, Giuseppe und Saletan, Eugène Jérôme (1977): „Ambiguities in the Lagrangian and Hamiltonian formalism: Transformation properties“. *Il Nuovo Cimento* 40B, S. 67-89.
- Martin, Christopher (2002): „Gauge principles, gauge arguments and the logic of nature“. *Philosophy of Science* 69, S. S221-S234.
- Maudlin, Tim (1989): „The essence of space-time“. In: A. Fine und J. Leplin (Hgg.): *Proceedings of the 1988 Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association. Volume 2*. East Lansing: Philosophy of Science Association, S. 82-91.
- Maudlin, Tim (1993): „Buckets of water and waves of space: why spacetime is probably a substance“. *Philosophy of Science* 60, S. 183-203.
- Maudlin, Tim (1995): „Three measurement problems“. *Topoi* 14, S. 7-15.
- Maudlin, Tim (2002): „Thoroughly muddled McTaggart or how to abuse gauge freedom to create metaphysical monstrosities“. *Philosophers Imprint* 2.4. Mit einer Replik von John Earman.
- Maudlin, Tim (2010): „Can the world be only wavefunction?“. In: S. Saunders, J. Barrett, A. Kent und D. Wallace (Hgg.): *Many worlds? Everett, quantum theory, and reality*. Oxford: Oxford University Press, S. 121-143.
- Maudlin, Tim (2011): *Quantum non-locality and relativity. Third edition*. Chichester: Wiley-Blackwell.
- McLaughlin, Brian und Bennett, Karen (2005): „Supervenience“. In: E. N. Zalta (Hg.): *The Stanford Encyclopedia of Philosophy (Fall 2005 Edition)*. <http://plato.stanford.edu/entries/supervenience/>
- Meynell, Letitia (2008): „Why Feynman diagrams represent“. *International Studies in the Philosophy of Science* 22, S. 39-59.
- Mill, John S. (1836): „On the definition and method of political economy“. In: D. Hausman (Hg.) (2008): *The philosophy of economics. An anthology*. New York: Cambridge University Press, 3. Auflage, S. 41-58.
- Misner, Charles W. (1974): „Some topics for philosophical inquiry concerning the theories of mathematical geometrodynamics and of physical geometrodynamics“. In: K. F. Schaffner und R. S. Cohen (Hgg.): *Proceedings of the 1972 Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association*. Dordrecht: Reidel, S. 7-29.
- Misner, Charles W., Thorne, Kip S. und Wheeler, John A. (1973): *Gravitation*. San Francisco: Freeman.
- Mittelstaedt, Peter und Strohmeyer, Ingeborg (1990): „Die kosmologische Antinomie in der Kritik

der reinen Vernunft und die moderne physikalische Kosmologie“. *Kantstudien* 81, S. 145-169.

Morganti, Matteo (2009): „Inherent properties and statistics with individual particles in quantum mechanics“. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 40, S. 223-231.

Muller, Fred und Seevinck, Michiel (2009): „Discerning elementary particles“. *Philosophy of Science* 76, S. 179-200.

Mumford, Stephen (1998): *Dispositions*. Oxford: Oxford University Press.

Nagel, Ernest (1961): *The structure of science*. London: Routledge.

Newton, Isaac (1726): *Mathematische Prinzipien der Naturlehre*. 1687, 3. Auflage 1726, übersetzt von J. P. Wolfers, Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft 1963.

North, John D. (1965): *The measure of the universe. A history of modern cosmology*. Oxford: Clarendon Press.

North, John D. (2008): *Cosmos. An illustrated history of astronomy and cosmology*. Chicago: University of Chicago Press.

Norton, John D. (1987): „Einstein, the hole argument and the reality of space“. In: J. Forge (Hg.): *Measurement, realism and objectivity*. Dordrecht: Kluwer, S. 153-188.

Norton, John D. (1989): „The hole argument“. In: A. Fine und J. Leplin (Hgg.): *Proceedings of the 1988 Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association*. East Lansing: Philosophy of Science Association, Vol. 2, S. 56-64.

Norton, John D. (1992): „Philosophy of space and time“. In: M. H. Salmon et al. (Hgg.): *Introduction to the philosophy of science. A text by members of the Department of the History and Philosophy of Science of the University of Pittsburgh*. Englewood Cliffs: Prentice Hall, S. 179-231.

Norton, John D. (2007a): „Causation as folk science“. In: H. Price und R. Corry (Hgg.): *Causality, physics, and the constitution of reality: Russell's republic revisited*. Oxford: Oxford University Press, S. 11-44.

Norton, John D. (2007b): „Do the causal principles of modern physics contradict causal anti-fundamentalism?“ In: P. Machamer u. G. Wolters (Hgg.): *Thinking about causes: From Greek philosophy to modern physics*. Pittsburgh: University of Pittsburgh Press, S. 222-234.

Norton, John D. (2009): „Is there an independent principle of causality in physics?“. *British Journal for the Philosophy of Science* 60, S. 475-486.

Norton, John D. (2011): „Observationally indistinguishable spacetimes: a challenge for any inductivist“. In: G. J. Morgan (Hg.): *Philosophy of science matters: the philosophy of Peter Achinstein*. Oxford: Oxford University Press, S. 164-176.

- Oriti, Daniele (Hg.) (2009): *Approaches to quantum gravity. Toward a new understanding of space, time and matter*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Pais, Abraham (1986): *Inward bound: of matter and forces in the physical world*. New York: Oxford University Press.
- Pauli, Wolfgang (1984): „Zur älteren und neueren Geschichte des Neutrinos“. In: W. Pauli: *Physik und Erkenntnistheorie*. Braunschweig: Vieweg, S. 156-180.
- Penrose, Roger (2005): *The road to reality*. New York: A. Knopf.
- Peres, Asher und Terno, Daniel R. (2001): „Hybrid classical-quantum dynamics“. *Physical Review A* 63, 022101.
- Perkins, Donald H. (2000): *Introduction to high energy physics*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Peskin, Michael E. und Schroeder, Daniel V. (1995): *An introduction to quantum field theory*. Boulder (Colorado): Westview Press.
- Petzoldt, Joseph (1890): „Maxima, Minima und Oekonomie“. *Vierteljahrsschrift für wissenschaftliche Philosophie* 14, 206-239, 354-366, 417-442
- Petzoldt, Joseph (1895): „Das Gesetz der Eindeutigkeit“. *Vierteljahrsschrift für wissenschaftliche Philosophie* 19, S. 148-203.
- Pietroski, P. und Rey, G. (1995): „When other things aren't equal: saving ceteris paribus laws from vacuity“. *British Journal for the Philosophy of Science* 46, S. 81-110.
- Pippard, A. B. (1966): *The elements of classical thermodynamics*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Pitts, Brian (2006): „Absolute objects and counterexamples: Jones-Geroch dust, Torretti constant curvature, tetrad-spinor, and scalar density“. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 37, S. 347-371.
- Planck, Max (1899): „Über irreversible Strahlungsvorgänge“. *Sitzungsberichte der königlich-preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin, Sitzungen der physikalisch-mathematischen Klasse*, S. 440-480.
- Planck, Max (1910): „Zur Theorie der Wärmestrahlung“. *Annalen der Physik* IV, S. 758-768.
- Planck, Max (1944): *Wege zur physikalischen Erkenntnis. Reden und Vorträge*. Leipzig: Hirzel, 4. Auflage.
- Polchinski, Joseph G. (2000): *String theory. 2 Vols*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Pontecorvo, Bruno (1946): „Inverse  $\beta$ -process“. Report PD-205 (National Research Council of Canada, Division of Atomic Energy). Wieder abgedruckt in K. Winter (Hg.) (2000): *Neutrino physics*. 2. Auflage. Cambridge: Cambridge University Press, S. 23-28.
- Pooley, Oliver (2006): „Points, particles, and structural realism“. In: D. Rickles, S. French und J.

- Saatsi (Hgg.): *The structural foundations of quantum gravity*. Oxford: Clarendon Press, S. 83-120.
- Post, Heinz (1975): „The problem of atomism“. *British Journal for the Philosophy of Science* 26, S. 19-26.
- Price, Huw (1996): *Time's arrow and Archimedes' point. New directions for the physics of time*. Oxford: Oxford University Press.
- Psillos, Stathis (1999): *Scientific realism: how science tracks truth*. New York: Routledge.
- Psillos, Stathis (2002): „Simply the best: a case for abduction“. In: A. Kakas und F. Sadri (Hgg.): *Computational logic: logic programming and beyond. Essays in honour of Robert A. Kowalski. Part II*. Berlin: Springer, S. 605-625.
- Psillos, Stathis (2006): „The structure, the whole structure, and nothing but the structure?“. *Philosophy of Science* 73, S. 560-570.
- Psillos, Stathis (2011): „Adding modality to ontic structuralism: an exploration and critique“. In: E. Landry und D. Rickles (Hgg.): *Structure, object, and causality*. Dordrecht: Springer.
- Pulte, Helmut (1989): *Das Prinzip der kleinsten Wirkung und die Kraftkonzeption der rationalen Mechanik: eine Untersuchung zur Grundlagenproblematik bei Leonhard Euler, Pierre Louis Moreau de Maupertuis und Joseph Louis Lagrange*. Stuttgart: Steiner. (Sonderheft 19 der *Studia Leibniziana*).
- Quine, Willard Van Orman (1976): „Grades of discriminability“. *Journal of Philosophy* 73, S. 113-116.
- Rapp, Christof (1997): *Vorsokratiker*. München: Beck.
- Ray, Christopher (1987): *The evolution of relativity*. Bristol: Hilger.
- Ray, Christopher (1991): *Time, space and philosophy*. London: Routledge.
- Redhead, Michael (1987): *Incompleteness, nonlocality, and realism: a prolegomenon to the philosophy of quantum mechanics*. Oxford: Clarendon Press.
- Reichenbach, Hans (1928): *Philosophie der Raumzeit-Lehre*. Braunschweig: Vieweg 1977.
- Reines, Frederick et al. (1960): „Detection of the free antineutrino“. *Physical Review* 117, S. 159-174.
- Reines, Frederick (1996): „The neutrino: from poltergeist to particle“. *Reviews of Modern Physics* 68, S. 317-327.
- Resnik, David B. (1994): „Hacking's experimental realism“. *Canadian Journal of Philosophy* 24, S. 395-412.
- Rickles, Dean (2007): *Symmetry, structure, and spacetime*. Amsterdam: Elsevier.
- Rickles, Dean und French, Steven (2006): „Quantum gravity meets structuralism“. In: D. Rickles,

- S. French und J. Saatsi (Hgg.): *The structural foundations of quantum gravity*. Oxford: Clarendon Press, S. 1-39.
- Rickles, Dean, French, Steven und Saatsi, Juha (Hgg.) (2006): *The structural foundations of quantum gravity*. Oxford: Clarendon Press.
- Röd, Wolfgang (1988): *Die Philosophie der Antike 1 (Geschichte der Philosophie, Band 1)*. München: Beck, 2. Auflage.
- Röd, Wolfgang (1994): *Der Weg der Philosophie*, Band I. München: Beck.
- Rohrlich, Fritz (1990): *Classical Charged Particles*. Reading (Massachusetts): Perseus Books.
- Rovelli, Carlo (2004): *Quantum gravity*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Rovelli, Carlo (2008): „Forget time“. [www.fqxi.org/community/forum/topic/237](http://www.fqxi.org/community/forum/topic/237)
- Russell, Bertrand (1912): „On the notion of cause“. *Proceedings of the Aristotelian Society* 13, S. 1-26.
- Rutherford, Ernest (1911): „The scattering of  $\alpha$  and  $\beta$  particles by matter and the structure of the atom“. *Philo. Mag.* 21, S. 669-688.
- Ryckman, Thomas (1992): „P(oint)-c(oincidence)-thinking: the ironical attachment of logical empiricism to general relativity (and some lingering consequences)“. *Studies in History and Philosophy of Science* 23, S. 471-497.
- Sakurai, Jun John (1967): *Advanced quantum mechanics*. Reading (Massachusetts): Addison-Wesley.
- Sambursky, Samuel (1987): *The physical world of the Greeks*. Princeton: Princeton University Press.
- Saunders, Simon (2003a): „Critical notice: Cao’s ‘The conceptual development of 20th century field theories’“. *Synthese* 136, S. 79-105.
- Saunders, Simon (2003b): „Physics and Leibniz’s principles“. In: K. Brading und E. Castellani (Hgg.): *Symmetries in physics: philosophical reflections*. Cambridge: Cambridge University Press, S. 289-307.
- Saunders, Simon (2006): „Are quantum particles objects?“ *Analysis* 66, S. 52-63.
- Saunders, Simon, Barrett, Jonathan, Kent, Adrian und Wallace, David (Hgg.) (2010): *Many worlds? Everett, quantum theory, and reality*. Oxford: Oxford University Press.
- Schaffer, Jonathan (2009): „Spacetime the one substance“. *Philosophical Studies* 145, S. 131-148.
- Scheibe, Erhard (1997): *Die Reduktion physikalischer Theorien: ein Beitrag zur Einheit der Physik. Teil I: Grundlagen und elementare Theorie*. Berlin: Springer.
- Scheibe, Erhard (1999): *Die Reduktion physikalischer Theorien: ein Beitrag zur Einheit der Physik. Teil II: Inkommensurabilität und Grenzfallreduktion*. Berlin: Springer.
- Scheibe, Erhard (2007): *Die Philosophie der Physiker*. München: Beck. 2. Auflage.

- Schilpp, Paul A. (Hg.) (1956): *Albert Einstein*. Stuttgart: Vieweg.
- Schlick, Moritz (1919): *Raum und Zeit in der gegenwärtigen Physik*. Berlin: Springer, 2. Auflage.
- Schlosshauer, Maximilian (2007): *Decoherence and the quantum-to-classical transition*. Berlin: Springer.
- Schlosshauer, Maximilian und Fine, Arthur (2005): „On Zurek’s derivation of the Born rule“. *Foundations of Physics* 35, S. 197-213.
- Schramm, Matthias (1985): *Natur ohne Sinn? Das Ende des teleologischen Weltbildes*. Graz: Styria.
- Schrenk, Markus (2007): „Can capacities rescue us from ceteris paribus laws?“. In: M. Kistler und B. Gnassounou (Hgg.): *Dispositions and Causal Powers*. Aldershot: Ashgate, S. 221-247.
- Schrödinger, Erwin (1926): „Quantisierung als Eigenwertproblem (zweite Mitteilung)“. *Annalen der Physik* 384, S. 489-527.
- Schurz, Gerhard (2002): „Ceteris paribus laws: classification and deconstruction“. *Erkenntnis* 52, S. 351-372.
- Schüller, Volkmar (Hg.) (1991): *Der Leibniz-Clarke Briefwechsel*. Berlin: Akademie-Verlag.
- Schwinger, Julian (1948): „Quantum electrodynamics I. A covariant formulation“. *Physical Review* 74, S. 1439-1461.
- Shapiro, Stewart (2000): *Philosophy of Mathematics*. Oxford: Oxford University Press.
- Sider, Ted (2001): *Four-dimensionalism: an ontology of persistence and time*. Oxford: Oxford University Press.
- Simons, Peter (1994): „Particulars in particular clothing: Three trope theories of substance“. *Philosophy and Phenomenological Research* 54, S. 553-575.
- Simonyi, Károly (1990): *Kulturgeschichte der Physik*. Thun: Harry Deutsch.
- Sklar, Lawrence (1974): *Space, time, and spacetime*. Berkeley: University of California Press.
- Sklar, Lawrence (1993): *Physics and chance. Philosophical issues in the foundations of statistical mechanics*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Skow, Bradford (2005): „Supersubstantivalism“. In: *Once upon a spacetime*. Dissertation, New York University. Unveröffentlicht.
- Sober, Elliott, (2003): „The design argument“. In: N. A. Manson (Hg.): *God and Design. The Teleological Argument and Modern Science*. London: Routledge, S. 25-53.
- Smeenk, Chris und Wüthrich, Christian (2011): „Time travel and time machines“. In Craig Callender (Hg.): *The Oxford Handbook of philosophy of time*. Oxford: Oxford University Press, S. 577-630.
- Sparber, Georg (2009): *Unorthodox Humeanism*. Frankfurt (Main): Ontos.
- Stachel, John (1974): „The rise and fall of geometrodynamics“. In: K. F. Schaffner und R. S. Cohen (Hgg.): *Proceedings of the 1972 Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association*.



Dordrecht: Reidel, S. 31-54.

Stachel, John (2002): „‘The relations between things’ versus ‘The things between relations’: the deeper meaning of the hole argument“. In: D. Malament (Hg.): *Reading natural philosophy*. LaSalle: Open Court, S. 231-266.

Stachel, John (2006): „Structure, individuality, and quantum gravity“. In: D. Rickles, S. French und J. Saatsi (Hgg.): *The structural foundations of quantum gravity*. Oxford: Oxford University Press, S. 53-82.

Stanford, P. Kyle (2006): *Exceeding our grasp: science, history, and the problem of unconceived alternatives*. New York: Oxford University Press.

Stein, Howard (1977): „Some Pre-History of General Relativity“. In: J. Earman, C. Glymour und J. Stachel (Hgg.): *Foundations of Space-Time Theories*. Minneapolis: University of Minnesota Press, S. 3-49.

Stöckler, Manfred (1993): „Hat sich Werner Heisenberg zu Recht auf Platon berufen?“. In: B. Geyer, H. Herwig und H. Rechenberg (Hgg.): *Werner Heisenberg. Physiker und Philosoph*, Heidelberg: Spektrum, S. 335-343.

Stöckler, Manfred (2007): „Philosophische Probleme der Quantentheorie“. In: A. Bartels und M. Stöckler (Hgg.): *Wissenschaftstheorie*. Paderborn: Mentis, S. 245-263.

Stöltzner, Michael (2003): „The principle of least action as the logical empiricist’s shibboleth“. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 34, S. 285-318.

Stöltzner, Michael (2005): „Drei Ordnungen formaler Teleologie. Ansichten des Prinzips der kleinsten Wirkung“. In: M. Stöltzner und P. Weingartner (Hgg.): *Formale Teleologie*. Paderborn: Mentis.

Stöltzner, Michael und Weingartner, Paul (Hgg.) (2005): *Formale Teleologie: Zur philosophischen Relevanz des Prinzips der kleinsten Wirkung und seiner Geschichte*. Paderborn: Mentis.

Stöltzner, Michael und Uebel, Thomas (Hgg.) (2006): *Wiener Kreis. Texte zur wissenschaftlichen Weltauffassung*. Hamburg: Meiner.

Stükelberger, Alfred (Hg.) (1979): *Antike Atomphysik. Texte zur antiken Atomlehre und zu ihrer Wiederaufnahme in der Neuzeit*. München: Heimeran.

Suárez, Mauricio (2008): „Experimental realism reconsidered: how inference to the most likely cause might be sound“. In: S. Hartmann, C. Hofer und L. Bovens (Hgg.): *Nancy Cartwright’s philosophy of science*. New York: Routledge, S. 137-163.

Suppes, Patrick (1970): *A probabilistic theory of causality*. Amsterdam: North-Holland.

Sutton, Christine (1992): *Spaceship neutrino*. Cambridge: Cambridge University Press.

Szabados, László B. (2009): „Quasi-local energy-momentum and angular momentum in general relativity“. *Living Reviews in Relativity* 12.4. <http://www.livingreviews.org/lrr-2009-4>

- Teller, Paul (1986): „Relational holism and quantum mechanics“. *British Journal for the Philosophy of Science* 37, S. 71-81.
- Teller, Paul (1991): „Substance, relations, and arguments about the nature of space-time“. *Philosophical Review* 100.3, S. 363-397.
- Terno, Daniel R. (2006): „Inconsistency of quantum-classical dynamics, and what it implies“. *Foundations of Physics* 36, S. 102-111.
- Thiemann, Thomas (2001): *Introduction to modern canonical quantum general relativity*. <http://arxiv.org/abs/gr-qc/0110034>
- Thiemann, Thomas (2007): *Modern canonical quantum general relativity*. Cambridge: Cambridge University Press.
- 't Hooft, Gerard (1999): „Quantum gravity as a dissipative deterministic system“. *Classical and Quantum Gravity* 16, S. 3263-3279.
- Thomson, J. J. (1897): „Cathode rays“. *Philosophical Magazine* 44, S. 293-316.
- Tolman, Richard C. (1938): „The principles of statistical mechanics“. Nachdruck Mineola (New York): Dover 1979.
- Tumulka, Roderich (2006): „A relativistic version of the Ghirardi-Rimini-Weber model“. *Journal of Statistical Physics* 125, S. 821-840.
- Uffink, Jos (2004): „Boltzmann's work in statistical physics“, In: E. N. Zalta (Hg.): *The Stanford Encyclopedia of Philosophy (Winter 2004 Edition)*. <http://plato.stanford.edu/entries/statphys-Boltzmann/>
- Uffink, Jos (2007): „Compendium of the foundations of classical statistical physics“. In: J. Butterfield und J. Earman (Hgg.): *Philosophy of Physics*. Amsterdam: Elsevier, S. 923-1047.
- Van Fraassen, Bas C. (1980): *The scientific image*. Oxford: Clarendon Press.
- Van Fraassen, Bas C. (1989): *Laws and symmetry*. Oxford: Clarendon Press.
- Van Fraassen, Bas C. (1991): *Quantum mechanics: an empiricist view*. Oxford: Clarendon Press.
- Van Fraassen, Bas C. (1993): „Armstrong, Cartwright, and Earman on laws and symmetry“. *Philosophy and Phenomenological Research* 53, S. 431-444.
- Van Melsen, Andrew G. M. (1957): *Atom gestern und heute*. Freiburg: Alber.
- Van Melsen, Andrew G. M. (1967): „Atomism“. In: Paul Edwards (Hg.): *The encyclopedia of philosophy*, Vol. I. New York: Macmillan, S. 193-198.
- Van Melsen, Andrew G. M. (1971): „Atomismus“ und „Atomtheorie“. In: J. Ritter (Hg.): *Historisches Wörterbuch der Philosophie*, Bd. 1. Basel: Schwabe, Sb. 603-611.
- Volovik, Grigory E. (2003): *The universe in a helium droplet*. Oxford: Clarendon Press.

- von Meyenn, Karl (Hg.) (1999): *Wolfgang Pauli, wissenschaftlicher Briefwechsel mit Bohr, Einstein, Heisenberg u.a.* 4 Bände. Berlin: Springer.
- von Meyenn, Karl (Hg.) (2011): *Eine Entdeckung von ganz außerordentlicher Tragweite, Schrödingers Briefwechsel zur Wellenmechanik und zum Katzenparadoxon.* Berlin: Springer.
- von Neumann, John (1932): *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik.* Berlin: Springer.
- von Plato, Jan (1994): *Creating modern probability.* Cambridge: Cambridge University Press.
- von Weizsäcker, Carl Friedrich (1971): *Die Einheit der Natur. Teil IV.* München: Hanser.
- Vranas, Peter B. M. (1998): „Epsilon-ergodicity and the success of equilibrium statistical mechanics“. *Philosophy of Science* 65, S. 688-708.
- Wald, Robert M. (1984): *General relativity.* Chicago: University of Chicago Press.
- Wald, Robert M. (2001): „The Thermodynamics of Black Holes“. *Living Reviews in Relativity* 4.6.
- Wayne, Andrew (2008): „A trope-bundle ontology for field theory“. In: D. Dieks (Hg.): *Philosophy and Foundations of Physics, Bd. 4, The Ontology of Spacetime II,* Amsterdam: Elsevier. S. 1-16.
- Weinberg, Steven (1995): *The quantum theory of fields. Volume I. Foundations.* Cambridge: Cambridge University Press.
- Weiner, Charles (1966): *Interview with Dr. Richard Feynman, March 4 to June 28, 1966, Vol. 2.* College Park (Maryland): Niels Bohr Library & Archives, American Institute of Physics.
- Weingard, Robert (1988): „Virtual Particles and the Interpretation of Quantum Field Theory“. In: H.R. Brown und R. Harré (Hgg.): *Philosophical foundations of quantum field theory.* Oxford: Clarendon Press, S. 43-58.
- Wesson, Paul S. (2006): *Five-dimensional physics: Classical and quantum consequences of Kaluza-Klein cosmology.* Singapore: World Scientific.
- Westman, Hans und Sonogo, Sebastian (2008): „Events and observables in generally invariant spacetime theories“. *Foundations of Physics* 38, S. 908-915.
- Weyl, Hermann (1923): *Raum, Zeit, Materie. Vorlesungen über allgemeine Relativitätstheorie.* Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft. 6. Auflage 1961.
- Weyl, Hermann (1952): *Symmetry.* Princeton: Princeton University Press.
- Wheeler, John A. (1962): „Curved empty space-time as the building material of the world“. In: E. Nagel, P. Suppes und A. Tarski (Hgg.): *Logic, methodology and philosophy of science* (Proceedings of the 1960 International Congress). Stanford: Stanford University Press, S. 361-374.
- Wiese, Uwe-Jens (2004): *Quantum field theory.* Unpubliziertes Vorlesungsskript, Institut für Theoretische Physik, Universität Bern.
- Wightman, Arthur S. (1956): „Quantum field theory in terms of vacuum expectation values“. *Physical Review* 101, S. 860-866.

- Wigner, Eugene P. (1939): „On unitary representations of the inhomogeneous Lorentz group“. *Annals of Mathematics* 40, S. 149-204.
- Wigner, Eugene (1979): *Symmetries and reflections*. Woodbridge (Connecticut): Ox Bow Press.
- Will, Clifford M. (2006): „The confrontation between general relativity and experiment“. *Living Reviews in Relativity* 9.3.
- Woodward, James (2000): „Explanation and invariance in the special sciences“. *British Journal for the Philosophy of Science* 51, S. 197-254.
- Woodward, James (2002) „There is no such thing as a ceteris paribus law“. *Erkenntnis* 57, S. 303-328.
- Woodward, James (2003): *Making things happen: a theory of causal explanation*. Oxford: Oxford University Press.
- Woodward, James (2007): „Causation with a human face“. In: H. Price und R. Corry (Hgg.): *Causality, Physics, and the Constitution of Reality: Russell's Republic Revisited*. Oxford: Oxford University Press.
- Worrall, John (1989): „Structural realism: the best of two worlds?“. *Dialectica* 43, S. 99-124.
- Wüthrich, Adrian (2010): *The genesis of Feynman diagrams*. Dordrecht: Springer.
- Wüthrich, Christian (2005): „To quantize or not to quantize: fact and folklore in quantum gravity“. *Philosophy of Science* 72, S. 777-788.
- Wüthrich, Christian (2006): *Approaching the Planck scale from a generally relativistic point of view*. Dissertation, University of Pittsburgh.
- Wüthrich, Christian (2009): „Challenging the spacetime structuralist“. *Philosophy of Science* 76, S. 1039-1051.
- Wüthrich, Christian (2011): „A la recherche de l'espace-temps perdu“. Erscheint in S. LeBihan (Hg.): *La philosophie de la physique aujourd'hui*. Paris: Syllepse Editions.
- Yourgrau, Wolfgang und Mandelstam, Stanley (1968): *Variational principles in dynamics and quantum theory*. London: Pitman.
- Zeh, H.-Dieter (1970): „On the interpretation of measurement in quantum theory“. *Foundations of Physics* 1, S. 69-76.
- Zeh, H.-Dieter (2007): *The physical basis of the direction of time*. Berlin: Springer, 5. Auflage.
- Zeh, H.-Dieter (2010): „Quantum discreteness is an illusion“. *Foundations of Physics* 40, S. 1476-1493.
- Zizzi, Paola A. (2001): „Quantum computation toward quantum gravity“. *General Relativity and Gravitation* 33, S. 1305-1318.
- Zurek, Wojciech H. (2003): „Environment-assisted invariance, entanglement, and probabilities in

