

Naturphilosophie: von der Metaphysik zur Physik

Michael Esfeld

Universität Lausanne, Sektion Philosophie

CH-1015 Lausanne, Schweiz

Michael-Andreas.Esfeld@unil.ch

(eingeladener Beitrag für *Wiener Jahrbuch für Philosophie* XLVII (2015))

I. *Naturphilosophie in der gegenwärtigen Metaphysik*

In der Naturphilosophie stehen die naturwissenschaftliche Erforschung der Welt und die philosophische Reflexion auf die Welt untrennbar zusammen. Naturphilosophie versucht, eine Antwort auf im wesentlichen die folgenden drei Fragen zu geben:

- 1) Was ist Materie? Was sind Raum und Zeit?
- 2) Was sind die Naturgesetze?
- 3) Wie erklärt die Materie in Raum und Zeit, indem ihr Verhalten bestimmten Gesetzen unterliegt, die beobachtbaren Phänomene?

Es ist offensichtlich, dass eine Antwort auf diese Fragen naturwissenschaftliche Forschung und philosophische Reflexion in einem erfordert. Das gilt schon für die ersten Vorsokratiker – die ionischen Naturphilosophen – und umso mehr für die frühe Neuzeit, den Höhepunkt der Naturphilosophie in den Werken von Descartes, Newton und Leibniz. Newtons Hauptwerk, die *Philosophiae naturalis principia mathematica*, beginnt mit einer Reflexion auf Raum, Zeit, Materie und Bewegung und formuliert aus dieser Reflexion heraus grundlegende Naturgesetze, die sich in eine präzise mathematische Form bringen lassen und dadurch zu empirisch testbaren Voraussagen führen. In der Naturphilosophie wird „Metaphysik“ wörtlich als dasjenige verstanden, was nach der Physik kommt und unmittelbar auf sie folgt: die Reflexion auf die grundlegenden Prinzipien der *physis*, der Natur. Kurz, Naturphilosophie steht für eine Physik aus Reflexion darüber, was es grundlegend in der Natur gibt und was im Grunde die Natur zusammenhält, und für eine Metaphysik, die in konkrete physikalische Theorien übergeht mit empirisch testbaren Konsequenzen.

Im 20. Jahrhundert ist diese Einheit von Physik und Metaphysik weitgehend verloren gegangen. In der Quantenphysik gewann mit der Kopenhagener Schule eine instrumentalistische Haltung die Oberhand. Die Strafe folgt jedoch auf den Fuß mit dem Messproblem der Quantenphysik, dem diese Haltung ausgesetzt ist: Man kann nicht definieren, was als Messung zählt, geschweige denn rechtfertigen, wieso eine Mess-Interaktion, im Gegensatz zu anderen Interaktionen, die grundlegenden dynamischen Gesetze (wie in diesem Falle die Schrödinger-Gleichung) außer Kraft setzen sollte. Verdeutlicht wird dieses Problem zum Beispiel in dem Gedankenexperiment von Schrödingers Katze:¹ Ist das Schicksal der Katze – eines Lebewesens mit bewusster Wahrnehmung seiner Umgebung – eine Messung dessen, ob ein radioaktives Atom zerfallen ist? Oder ist die Katze selbst Teil des zu messenden Quantensystems, so dass ihr Schicksal Teil der quantenmechanischen

¹ Siehe E. Schrödinger, Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik, in: *Die Naturwissenschaften* 23 (1935), 807–812.

Zustandsverschränkung ist (Superpositionszustand aus lebendiger und toter Katze)? Und wieso sollte diese Zustandsverschränkung dann dadurch abgebrochen werden, dass ein Experimentalphysiker mit Dokortitel – im Unterschied zu einem einfachen Lebewesen mit Bewusstsein wie eine Katze – die Situation beobachtet?² Die Kopenhagener Deutung der Quantenphysik gehört inzwischen der Vergangenheit an. Dennoch ist das Newtonsche Pendant zur Quantenphysik, nämlich Physik geleitet durch Reflexion über die Natur, immer noch eine Minderheitsposition.

Was die Metaphysik betrifft, so ist diese seit den 1970er Jahren wieder Kernbestandteil der Philosophie. Jedoch dominiert eine so genannte analytische Metaphysik, die weitgehend aus dem Lehnstuhl erfolgt – nämlich als Begriffsanalyse³ – und daher fast vollständig von den Naturwissenschaften abgelöst ist (trotz häufiger gegenteiliger Lippenbekenntnisse). Dem gegenüber hat sich vor allem in den letzten zehn Jahren eine naturalisierte Metaphysik herausgebildet, die einen starken neo-positivistischen Akzent hat:⁴ Es wird suggeriert, dass man metaphysische Schlussfolgerungen mehr oder weniger direkt aus dem Formalismus einer physikalischen Theorie ablesen könnte. Das erwähnte Messproblem der Quantenphysik zeigt jedoch, dass dieses Unternehmen nicht gelingen kann: Der auf von Neumann⁵ und die Kopenhagener Deutung zurückgehende Lehrbuch-Formalismus der Quantenphysik ist strikte genommen inkonsistent, da er die dynamische Grundgleichung der Theorie (die Schrödinger-Gleichung) in bestimmten Situationen (Messungen) aussetzt, ohne physikalisch diese Situationen eingrenzen zu können (Was unterscheidet Messungen von anderen Interaktionen?). Jede Lösung dieses Problems besteht darin, eine Theorie des Gegenstandsbereich der Quantenphysik mit entsprechenden dynamischen Gesetzen zu formulieren, aus denen dann Voraussagen für Messergebnisse abgeleitet werden. Das aber heißt: Physik betreiben aus einer Reflexion darüber, was es im Grunde in der Natur gibt, statt positivistisch Metaphysik aus dem Formalismus einer physikalischen Theorie herauslesen zu wollen.

Dementsprechend ist dieser Artikel ein Plädoyer für Naturphilosophie im oben genannten, Newtonschen Sinne. Im Folgenden werde ich den Atomismus von Demokrit und Newton aufnehmen und diesen als Leitfaden benutzen, um wesentliche naturphilosophische Fragestellungen einzuführen und Position zu beziehen.

II. *Atomismus: Demokrit, Newton und die heutige Situation*

Demokrit vertritt gemäß dem Bericht von Plutarch:

„... in dem Leeren zerstreut bewegten sich Substanzen, der Zahl nach unendlich wie auch unteilbar und unterschiedslos und ohne Qualität und für Einwirkung unempfindlich; wenn sie sich einander näherten oder zusammenstießen oder verflochten, so träten einige dieser Anhäufungen als Wasser, andere als Feuer, andere als Pflanze und wieder andere als Mensch in Erscheinung.“⁶

Ähnlich schreibt Newton am Ende der *Optik*:

² Vgl. J. S. Bell, *Speakable and unspeakable in quantum mechanics*, Cambridge 2004, S. 217.

³ Vgl. F. Jackson, *From metaphysics to ethics. A defence of conceptual analysis*, Oxford 1998.

⁴ Vgl. J. Ladyman / D. Ross, *Every thing must go. Metaphysics naturalized*, Oxford 2007.

⁵ J. von Neumann, *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik*, Berlin 1932.

⁶ Fragment Diels-Kranz 68 A57. Zitiert gemäß J. Mansfeld, *Die Vorsokratiker. Band 2*, Stuttgart 1986, S. 281.

„Nach allen diesen Betrachtungen ist es mir wahrscheinlich, dass Gott im Anfange der Dinge die Materie in massiven, festen, harten, undurchdringlichen und beweglichen Partikeln erschuf ... Damit also die Natur von beständiger Dauer sei, ist der Wandel der körperlichen Dinge ausschliesslich in die verschiedenen Trennungen, neuen Vereinigungen und Bewegungen dieser permanenten Theilchen zu verlegen ...“⁷

Die Attraktivität des Atomismus geht aus diesen Zitaten klar hervor: Auf der einen Seite handelt es sich um einen Vorschlag für eine fundamentale Ontologie, die einfach, sparsam und allgemein ist in dem Sinne, dass sie für alles in der Welt gilt. Auf der anderen Seite ist diese Ontologie reich genug, um eine klare Erklärung der beobachtbaren Phänomene zu geben. Makroskopische Objekte bis hin zu ganzen Galaxien sind aus kleinsten, unteilbaren Teilchen zusammengesetzt. Alle Unterschiede zwischen makroskopischen Objekten – zu einer gegebenen Zeit ebenso wie in ihrer zeitlichen Entwicklung – können auf die räumliche Anordnung dieser Teilchen und die Veränderung dieser Anordnung zurückgeführt werden.

Während der Atomismus der Vorsokratiker Leukipp und Demokrit eine rein philosophische Idee ist, wird er von Newton als eine präzise physikalische Theorie ausgeführt, indem dieser mathematische Bewegungsgesetze für die Entwicklung der räumlichen Anordnung der Atome formuliert. Dementsprechend gelten die klassische Mechanik – und die klassische statistische Physik – als der größte Triumph des Atomismus. Hingegen ist heute der Eindruck weit verbreitet, dass der Atomismus durch die Physik des 20. Jahrhunderts überholt ist. Ein solches Urteil ist jedoch verfrüht. Man kann im Wesentlichen die folgenden drei Gründen für die weiterhin bestehende Attraktivität des Atomismus anführen:

- 1) Alle experimentellen Befunde in der fundamentalen Physik sind Befunde von Teilchen – von Punkten auf einem Schirm (wie zum Beispiel im berühmten Doppelspalt-Versuch) bis zu Spuren in der Nebelkammer (ein typisches Experiment in der Quantenfeldtheorie). Physikalische Entitäten, die keine Teilchen sind – wie zum Beispiel Wellen oder Felder –, werden zur Erklärung des beobachteten Verhaltens von Teilchen herangezogen, sind aber selbst nicht Bestandteil der experimentellen Befunde. Diese experimentelle Situation ist ein starkes Argument für den Atomismus: Teilchen-Befunde werden am einfachsten durch eine Teilchen-Ontologie erklärt.
- 2) In der Quantenphysik ist ebenso wie in der klassischen Physik eine Theorie makroskopischer Objekte – wie zum Beispiel eines Zeigers, der in eine bestimmte Richtung zeigt, oder einer Katze, die lebendig oder tot ist – in Begriffen einer bestimmten Verteilung von Materie im Raum erforderlich. Es gibt gute Gründe dafür anzunehmen, dass man, wenn man nur die mit der Schrödinger-Gleichung gegebene Zeitentwicklung des Quantenzustands anerkennt, nicht zu diesem Ziel gelangen kann.⁸ Das, was über den Quantenzustand hinausgeht, ist in der heutigen Literatur als *primitive Ontologie* bekannt.⁹ Dieser Begriff steht für eine Ontologie, die eine Verteilung von Materie im physikalischen

⁷ Zitiert gemäß I. Newton, *Optik oder Abhandlung über Spiegelungen, Brechungen, Beugungen und Farben des Lichts*. Übersetzt von William Abendroth. Band 2. Leipzig 1898, S. 143.

⁸ Siehe insbesondere die Arbeiten von T. Maudlin: Can the world be only wavefunction?, in: S. Saunders / J. Barrett / A. Kent / D. Wallace (Hgg.), *Many worlds? Everett, quantum theory, and reality*, Oxford 2010, 121–143; The universal and the local in quantum theory, in: *Topoi* 34 (2015), DOI 10.1007/s11245-015-9301-z. Siehe dagegen insbesondere D. Wallace, *The emergent multiverse. Quantum theory according to the Everett interpretation*, Oxford 2012, und D. Z. Albert, *After physics*, Cambridge (Mass.) 2015.

⁹ D. Dürr / S. Goldstein / N. Zanghì, *Quantum physics without quantum philosophy*, Berlin 2013, Kapitel 2.

Raum als fundamental annimmt und dementsprechend ein Gesetz für die zeitliche Entwicklung der räumlichen Materiekonfiguration formuliert, das über die Schrödinger-Gleichung hinausgeht. Kurz gesagt: Es gibt immer eine definite Materieverteilung im Raum – ein Atom ist immer entweder zerfallen oder nicht zerfallen, eine Katze immer entweder lebendig oder tot –, aber die zeitliche Entwicklung dieser Materieverteilung unterliegt einem spezifisch quantenphysikalischen Gesetz. Die bekannteste Quantentheorie in diesem Sinne ist die auf de Broglie¹⁰ und Bohm¹¹ zurückgehende Theorie, deren dominante heutige Version als Bohmsche Mechanik bekannt ist.¹² Diese Theorie steht in der Tradition des Atomismus: Materie besteht aus punktförmigen Teilchen, die sich auf Bahnen gemäß einem deterministischen, dynamischen Gesetz bewegen, aus dem die experimentellen Voraussagen der Quantenmechanik hervorgehen. Also gilt wiederum: Teilchen-Befunde am einfachsten erklärt durch Teilchen-Ontologie (kein Messproblem in der Bohmschen Mechanik).

- 3) Wenn man über die Quantenmechanik hinausgeht, so muss man feststellen, dass es bis heute keine vollständig ausgearbeitete Ontologie der Quantenfeldtheorie gibt, geschweige denn der Quantengravitation. Das liegt zum Teil an ungelösten mathematischen Problemen der Quantenfeldtheorie. Dirac bezeichnete die fehlende Ontologie und die ungelösten mathematischen Probleme als Schwierigkeiten erster und zweiter Klasse. Seine Hoffnung war, dass Fortschritte in der Lösung letzterer Schwierigkeiten auch zu Fortschritten in der Ontologie führen werden.¹³ Diese Hoffnung hat sich bisher nicht erfüllt. Insbesondere gibt es trotz gegenteiliger Ankündigungen auf dem gegenwärtigen Stand der Forschung nichts, das in der Quantenfeldtheorie an die Stelle des Atomismus mit vergleichbarer Erklärungskraft treten könnte. In jedem Fall betrifft das Messproblem die Quantenfeldtheorie (und die Ansätze zu einer Quantentheorie der Gravitation) in gleicher Weise wie die Quantenmechanik.¹⁴

Aus diesen Gründen ist es weiterhin sinnvoll, den Atomismus als ein erfolgversprechendes Paradigma in der Naturphilosophie zu verfolgen.

III. Was sind die Atome? Räumliche Strukturen

Demokrit und Newton sehen die Atome so an, dass sie mit wenigen basalen intrinsischen Eigenschaften ausgestattet sind – das sind Eigenschaften, die jedes Atom für sich genommen hat, unabhängig davon, ob es andere Atome gibt. Das Paradebeispiel für eine solche Eigenschaft ist die Masse in der Newtonschen Mechanik. Aber auch in dieser Theorie werden sowohl die Ruhemasse als auch die schwere Masse durch ihre dynamische Rolle eingeführt. Das heißt, sie werden eingeführt als ein dynamischer Parameter, der etwas darüber aussagt, wie die Bewegungen der Teilchen miteinander verbunden sind, wie unter anderem Mach

¹⁰ L. de Broglie, La nouvelle dynamique des quanta, in: *Electrons et photons. Rapports et discussions du cinquième Conseil de physique tenu à Bruxelles du 24 au 29 octobre 1927 sous les auspices de l'Institut international de physique Solvay*, Paris 1928, 105–132.

¹¹ D. Bohm, A suggested interpretation of the quantum theory in terms of 'hidden' variables, in: *Physical Review* 85 (1952), 166–193.

¹² Siehe D. Dürr / S. Goldstein / N. Zanghì, *Quantum physics without quantum philosophy*, Berlin 2013.

¹³ P. A. M. Dirac, The evolution of the physicist's picture of nature, in: *Scientific American* 208 (1963).

¹⁴ Siehe J. A. Barrett, Entanglement and disentanglement in relativistic quantum mechanics, in: *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 48 (2014), 168–174.

herausgestrichen hat.¹⁵ Ein intrinsischer Charakter der Masse, wenn es ihn denn gäbe, wäre physikalisch jedenfalls nicht zugänglich. Dasselbe gilt für die Ladung. Dennoch kann man vertreten, dass Parameter wie Masse und Ladung in der klassischen Physik durch die dynamische Rolle, die sie für die Teilchenbewegung spielen, eingeführt werden, diese Beschreibung in Begriffen einer dynamischen Rolle jedoch auf eine zugrunde liegende intrinsische Eigenschaft der Teilchen Bezug nimmt.¹⁶

Auf jeden Fall wirft jedoch die Quantenphysik weiteren Zweifel auf die Sicht von Substanzen, die durch intrinsische Eigenschaften charakterisiert sind, welche die abendländische Metaphysik seit Aristoteles dominiert. Kurz gesagt, in der Quantenphysik sind auch klassische dynamische Parameter wie Masse und Ladung auf der Ebene des Quantenzustands angesiedelt; wegen der Zustandsverschränkungen ist es nicht möglich, Quantenobjekten je für sich genommen einen Zustand zuzusprechen. Nur der gesamten Konfiguration von Quantenobjekten kommt ein Zustand zu (repräsentiert durch die Wellenfunktion). Deshalb sind die Quanten-Zustandsverschränkungen ein wesentliches Argument dafür, die Sicht von physikalischen Objekten als durch intrinsische Eigenschaften charakterisiert aufzugeben.¹⁷

Was aber bleibt dann von den Atomen übrig? Wenn nicht durch intrinsische Eigenschaften, dann bleibt nur der Ort im Raum als Charakteristikum der Atome. In der Tat sehen Demokrit und Newton die Atome so an, dass sie in einen absoluten Raum eingefügt sind, der dreidimensional und euklidisch ist. Ebenso entwickelt sich die Konfiguration der Atome in einer absoluten Zeit. „Absolut“ heißt hier, dass die Geometrie des Raumes und der Zeit unabhängig davon ist, wie Materie in Raum und Zeit angeordnet ist, ja sogar unabhängig davon ist, ob es überhaupt Materie in Raum und Zeit gibt. Diese Festlegung ist jedoch ebenfalls problematisch. Wenn es einen absoluten Raum gibt, dann gibt es reale Unterschiede, die keinen physikalischen Unterschied machen: Wie Leibniz in seinen berühmten Einwänden gegen Newton herausstellt, gibt es sehr viele verschiedene Möglichkeiten, die gesamte Materiekonfiguration in einem absoluten Raum anzuordnen, wobei die räumlichen Relationen zwischen den Materieteilchen in allen diesen Konfigurationen gleich sind, also kein physikalischer Unterschied zwischen ihnen besteht.¹⁸

Ferner wirft diese Sicht folgende Frage auf: Was ist es, das Raumpunkte besetzt? Mit anderen Worten: Was ist der Unterschied zwischen einem leeren Raumpunkt und einem Raumpunkt, der durch ein Teilchen besetzt ist? Wenn man einen Dualismus von absolutem Raum als einer Substanz und Materie als einer weiteren Substanz vertritt, dann muss man die Frage beantworten können, wodurch sich diese beiden Substanzen unterscheiden. Wie wir oben gesehen haben, scheidet die Antwort, von Teilchen besetzte Raumpunkte durch intrinsische Eigenschaften wie Masse und Ladung zu charakterisieren, spätestens in der Quantenphysik aus. Und Lockes Antwort, dass es sich bei Materie um ein eigenschaftsloses Substratum handelt,¹⁹ ist ebenso problematisch wie die Antwort, dass jeder Materiepunkt

¹⁵ E. Mach, *Die Mechanik in ihrer Entwicklung. Historisch-kritisch dargestellt*, Leipzig 1883, 241.

¹⁶ Siehe z.B. F. Jackson, *From metaphysics to ethics. A defence of conceptual analysis*, Oxford 1998, 23–24.

¹⁷ Siehe dazu ausführlich M. Esfeld / D. Lazarovici / V. Lam / M. Hubert, The physics and metaphysics of primitive stuff, in: *The British Journal for the Philosophy of Science* 66 (2015), DOI 10.1093/bjps/axv026.

¹⁸ Siehe C. I. Gerhardt (Hg.), *Die philosophischen Schriften von G. W. Leibniz. Band 7*, Berlin 1890, 363–364, 373–374 (3. Brief, §§ 5–6, 4. Brief, §§ 15).

¹⁹ *An essay concerning human understanding* (1690), Buch II, Kapitel XXIII, § 2.

durch eine primitive, weil eigenschaftslose Diesheit (haecceitas) gekennzeichnet ist. Diese Antworten sind deshalb problematisch, weil eigenschaftslose Substrata oder Diesheiten mit gutem Grund als mysteriös angesehen werden können – etwas, das da sein soll, dem aber keinerlei qualitative Prädikate zukommen: Man kann nicht sagen, was es ist.

Es gibt also gute philosophische Gründe dafür, Leibniz' Kritik an Newton zu folgen und den Dualismus von absolutem Raum und Materie durch einen Monismus von Materiepunkten zu ersetzen, die in räumlichen Relationen stehen. Gemäß Leibniz' Relationalismus besteht der Raum in den räumlichen Relationen zwischen den Materiepunkten, so dass diese Relationen eine Materiekonfiguration aufbauen. Alle mathematischen Transformationen von Materiekonfigurationen, welche die räumlichen Relationen zwischen den Materiepunkten unverändert lassen, sind mathematische Repräsentationen einer und derselben Materiekonfiguration. Damit sind alle Fälle ontologischer Unterschiede, die keinen physikalischen Unterschied machen, ausgeschlossen.

Die räumlichen Relationalen verändern sich. Daraus ergibt sich eine Abfolge universeller Materiekonfigurationen. Die Zeit ist gemäß Leibniz aus der Veränderung der Materiekonfigurationen abgeleitet: Die Zeit ist die Ordnung der Abfolge der universellen Materiekonfigurationen.²⁰ Um die räumlichen Relationen zu beschreiben, benötigen wir natürlich eine Geometrie. In der euklidischen Geometrie zum Beispiel werden die räumlichen Relationen in Begriffen euklidischer Längen und Richtungen in Begriffen von Winkeln beschrieben. Daraus folgt aber nicht, dass es in der Natur einen euklidischen Raum gibt, in den diese Relationen eingebettet sind. Der euklidische Raum ist nur unser Mittel, um die räumlichen Relationen zwischen den Materiepunkten darzustellen. Dito für die Zeit: Wenn es Veränderung in den räumlichen Relationen zwischen den Materiepunkten gibt, dann gibt es eine Abfolge universeller Konfigurationen von Materiepunkten. Wenn diese Abfolge eine Ordnung hat, die eindeutig und gerichtet ist, und wenn die Zeit die Ordnung dieser Abfolge ist, dann ist die Topologie der Zeit absolut: Es gibt genau eine Weise, die aufeinanderfolgenden Materiekonfigurationen anzuordnen. Daraus folgt jedoch nicht, dass die Metrik der Zeit absolut ist, also die Zeit unabhängig davon fließt, wie die Veränderung in der Materiekonfiguration abläuft. Die Metrik der Zeit ist dadurch bestimmt, in der universellen Materiekonfiguration ein Untersystem herauszugreifen, relativ auf das die Veränderung in den räumlichen Beziehungen zu diesem Untersystem gemessen wird. Kurz, relationale Zeit heißt bei Leibniz relationale Metrik der Zeit, aber absolute Ordnung in der Veränderung der universellen Materiekonfiguration.²¹

An der Debatte zwischen Leibniz und Newton wird die enge Verzahnung von Metaphysik und Physik deutlich: Leibniz hat starke philosophische Argumente gegen Newtons Festlegung auf einen absoluten Raum und eine absolute Zeit auf seiner Seite. Newtons Physik – die Bewegungsgesetze der Newtonschen Mechanik – sind jedoch auf der Grundlage eines absoluten Raumes und einer absoluten Metrik der Zeit formuliert. Inertialbewegung ist geradlinig-gleichförmige Bewegung im absoluten Raum, und Beschleunigung durch Kräfte ist qua Abweichung von Inertialbewegung dementsprechend ebenfalls eine absolute Größe.

²⁰ Siehe C. I. Gerhardt (Hg.), *Die philosophischen Schriften von G. W. Leibniz. Band 7*. Berlin 1890, 363, 376 (3. Brief, § 4, 4. Brief, § 41).

²¹ Siehe S. Gryb / K. P. Y. Thébault, Time remains, in: *The British Journal for the Philosophy of Science* 66 (2015), DOI 10.1093/bjps/axu009 für eine Verteidigung dieser Konzeption der Zeit in der heutigen Physik bis hin zur allgemeinen Relativitätstheorie und der Quantengravitation.

Leibniz scheitert daran, dass er seine philosophischen Einwände gegen Newton nicht in eine Mechanik umsetzen kann, die nur mit räumlichen Relationen zwischen Teilchen und deren Veränderung arbeitet.

Generell gesagt: Natürlich ist es für die mathematische Physik am einfachsten, die Bewegungsgesetze auf der Grundlage eines absoluten Raumes zu formulieren, in den die Materie eingebettet ist. Das ist auch heute noch so: Die allgemeine Relativitätstheorie ist ebenfalls auf der Grundlage einer absoluten Raumzeit formuliert, die zwar dynamisch ist, aber nichtsdestoweniger gerade deshalb in der mathematischen Formulierung der Theorie als eine Substanz betrachtet wird, die zusätzlich zu der materiellen Substanz existiert. Die Einsteinschen Feldgleichungen lassen sogar leere Lösungen zu, die dann mathematische Darstellungen einer gekrümmten Raumzeit ohne Materie sind. Und natürlich gibt es gewichtige philosophische Einwände gegen die Festlegung auf die Existenz eines absoluten Raumes bzw. einer absoluten Raumzeit: eine sich ins Unendliche, weit über alle Materie hinaus erstreckende Substanz, die dazu führt, beliebig viele verschiedene Anordnungen der Materie im Raum bzw. der Raumzeit als verschiedene mögliche Welten anerkennen zu müssen, obwohl es keinen Unterschied innerhalb dieser Anordnungen gibt, und die uns in die Sackgasse hineinzwängt, die Frage beantworten zu müssen, was einen leeren von einem mit Materie besetzten Raumpunkt unterscheidet. Aber man muss diese Einwände in eine physikalische Theorie umsetzen, die zeigt, wie man die Physik aufbauen kann, ohne auf einen absoluten Raum und eine absolute Zeit festgelegt zu sein.

Dafür gibt es zwei Strategien: Die eine Strategie ist, die physikalischen Theorien so zu nehmen, wie sie in den Lehrbüchern formuliert sind, und zu zeigen, wie man das, was diese Theorien über die Welt aussagen, verstehen kann, ohne auf einen absoluten Raum und eine absolute Zeit festgelegt zu sein. Huggett hat diese Strategie für die Newtonsche Mechanik ausgearbeitet, indem er sich dem bedient, was in der heutigen Literatur als die Humesche Sicht von Naturgesetzen bekannt ist.²² Die Ontologie ist alleine die räumlicher Relationen zwischen Materiepunkten. Was die Geometrie betrifft, so legen die räumlichen Relationen in einer gegebenen universellen Materiekonfiguration zwar nicht die Geometrie fest; wenn man jedoch die gesamte Veränderung der universellen Materiekonfiguration betrachtet – mit anderen Worten die gesamte Abfolge universeller Materiekonfigurationen –, dann legt die Geschichte der räumlichen Relationen als Ganze eine Geometrie fest, welche am besten geeignet ist, die räumlichen Relationen und ihre Veränderung so zu erfassen, dass eine optimale Kombination aus Einfachheit und Informationsgehalt der Beschreibung dieser Relationen und ihrer Veränderung erreicht wird. Das heißt: Wenn die Welt Newtonsch ist, dann ist der euklidische Raum am besten geeignet, um die räumlichen Relationen in der Welt und ihre Veränderung in einer Weise zu erfassen, die einfach und informationsreich zugleich ist.

Dasselbe gilt für die Bewegungsgesetze und die in ihnen vorkommenden dynamischen Größen: Die Weise, wie die Veränderung der räumlichen Relationen zwischen den Materiepunkten abläuft, weist bestimmte Muster oder Regularitäten auf. Aufgrund dieser Muster oder Regularitäten kann man die Idee von Inertialbewegungen als die Idee besonders einfach und regulärer Bewegungen formulieren und dann Beschleunigung durch Kräfte als Abweichung von dieser einfachen Bewegung einführen – wiederum nur als Mittel, um die

²² N. Huggett, The regularity account of relational spacetime, in: *Mind* 115 (2006), 41–73.

Veränderung in den räumlichen Relationen der Materiepunkte auf eine Weise zu erfassen, die eine optimale Kombination von Einfachheit und Informationsgehalt erreicht. Das heißt: Die Beschleunigung, die man in der Newtonschen Mechanik einem Teilchen zu einer Zeit als eine absolute Größe zuschreibt, ist gemäß dieser philosophischen Analyse keine Größe, die diesem Teilchen als solchem zukommt, sondern abgeleitet aus der gesamten Geschichte der Veränderung der räumlichen Relationen im Universum als ein Mittel, um diese Veränderung auf eine besonders einfache und informationsreiche Weise zu erfassen. Die Strategie ist also diejenige, der Veränderung in den räumlichen Beziehungen zwischen den Teilchen im Universum insgesamt genommen ontologische Priorität zuzuerkennen und die Geometrie und die dynamischen Parameter als Mittel einzuführen, um diese Veränderung in einer Weise zu beschreiben, die zugleich einfach und reich an Informationsgehalt ist.

Wenn jedoch die Ontologie nur die eine räumlicher Relationen zwischen Materiepunkten und deren Veränderung ist, dann ist die ambitioniertere und methodologisch klarere Strategie diejenige, die physikalische Theorie direkt auf dieser Ontologie aufzubauen, statt eine mit einer anderen Ontologie formulierte physikalische Theorie so zu interpretieren, dass sie zu dieser Ontologie passt. Für die klassische Mechanik hat insbesondere Barbour diese Strategie ausgearbeitet.²³ Das Ergebnis ist, kurz gefasst, dass man die empirischen Voraussagen der Newtonschen Mechanik mit einer alternativen physikalischen Theorie, die auf der Ontologie räumlicher Relationen zwischen Materiepunkten und deren Veränderung aufgebaut ist, reproduzieren kann, sofern es im Universum Materieansammlungen gibt, die de facto die Rolle von Inertialsystemen spielen können, wie zum Beispiel die Fixsterne. Es ist aber nicht möglich, alle Situationen, welche die Newtonsche Mechanik zulässt, auf der Basis dieser Ontologie zu reproduzieren. Zum Beispiel ergibt die Idee eines Universums, das als Ganzes eine Rotationsbewegung durchführt, keinen Sinn in einer Ontologie, die nur räumliche Relationen zwischen Materiepunkten und deren Veränderung zulässt.

Zurück zu unserer Ausgangsfrage: Was sind die Atome? Wenn man keinen absoluten Raum und dementsprechend auch keine Raumpunkte anerkennt, dann kann man die räumlichen Relationen einsetzen, um die Materiepunkte zu charakterisieren: Es gibt Atome oder Teilchen, nämlich Materiepunkte. Diese sind materielle Punkte, weil es eine nicht verschwindende räumliche Relation zwischen je zwei solchen Punkten gibt. Kurz gesagt, das Wesen der Materie ist, dass materielle Objekte in räumlichen Beziehungen stehen. Wenn man sich auf einen Dualismus von Raum und Materie festlegt und Materiepunkte durch ihren Ort im Raum charakterisiert, dann sind es die Raumpunkte, die durch die Topologie und die Metrik des Raumes individuiert werden. Man läuft dann in die Sackgasse hinein, die Frage beantworten zu müssen, wodurch sich ein leerer von einem mit Materie besetzten Raumpunkt unterscheidet. Wenn es hingegen nur räumliche Relationen gibt, aber keine Punkte des absoluten Raumes, dann sind diese Relationen geeignet, die Punkte, zwischen denen sie bestehen, als Materiepunkte auszuzeichnen. Auf Weise kann man auch die Undurchdringlichkeit der Materie erklären, ohne auf Masse Bezug zu nehmen: Wenn zwei Materiepunkte sich überlappen würden, dann bestände keine räumliche Relation zwischen ihnen.

²³ Siehe z.B. J. B. Barbour, Relational concepts of space and time, in: *The British Journal for the Philosophy of Science* 33 (1982), 251–274, für eine klare philosophische Darstellung. Siehe für eine Übersicht O. Pooley / H. R. Brown, Relationalism rehabilitated? I: Classical mechanics, in: *The British Journal for the Philosophy of Science* 53 (2002), 183–204.

In gewisser Weise ist dieses die cartesische Konzeption der Materie als *res extensa*, die im Gegensatz zur scholastischen Charakterisierung der Materie durch – okkulte – Qualitäten steht. Allerdings wird hier Ausdehnung im Sinne räumlicher Relationen verstanden, die unausgedehnte Punkte miteinander verbinden: Etwas ist dadurch ein *Materiepunkt* – im Unterschied zu, sagen wir, einem hypothetischen Geistpunkt –, dass es in *räumlichen* Relationen zu anderen solchen Punkten steht. Mit anderen Worten: Es gibt keine Punkte des Raumes oder der Raumzeit in der Welt. Es gibt unausgedehnte Objekte (Punkte). Diese sind materiell, nämlich Materiepunkte, weil sie in räumlichen Relationen stehen. Würden sie nicht in räumlichen Relationen stehen – sondern, sagen wir, in hypothetischen, fundamentalen Denk-Relationen –, dann wären sie nicht Materie und keine physikalischen Entitäten, sondern mentale Entitäten.

Folglich sind die Materiepunkte nicht eigenschaftslose Substrata. Sie sind strukturell individuiert, nämlich durch räumliche Relationen: Alles, was die Materiepunkte ausmacht, sind die räumlichen Relationen, in denen sie stehen, so dass sich eine universelle Materiekonfiguration ergibt. Das Universum ist eine Abfolge solcher Materiekonfigurationen. Wie die Literatur zum ontischen Strukturenrealismus herausgestellt hat, können Strukturen im Sinne konkreter physikalischer Relationen – wie räumlicher Relationen – physikalische Objekte individuierten.²⁴ Wenn man den ontischen Strukturenrealismus einsetzt, um die Frage zu beantworten, was die Atome sind, vertritt man einen *moderaten* ontischen Strukturenrealismus:²⁵ Es gibt fundamentale physikalische Objekte, nämlich Materiepunkte. Diese haben aber keine intrinsische Essenz (gegeben durch intrinsische Eigenschaften, ein eigenschaftsloses Substratum oder eine primitive Diesheit), sondern eine relationale Essenz: Was diese Objekte sind, besteht in den Relationen, in denen sie stehen, nämlich den räumlichen Relationen.

Das Argument für diese Position ist offensichtlich: Strukturen sind über einer Menge von Objekten definiert. Mit anderen Worten: Wenn es Relationen gibt, dann gibt es auch Objekte (Relata), die in den betreffenden Relationen stehen. Nichts zwingt uns aber dazu, der auf Aristoteles zurückgehenden Position zu folgen, dass diese Objekte eine intrinsische Essenz (Form) haben müssen. Diese Position führt physikalisch in die Irre, weil sie sich nicht stichhaltig in entsprechende physikalische, intrinsische Eigenschaften übersetzen lässt. Nichtsdestoweniger kann man der Annahme einen guten physikalischen Sinn abgewinnen, dass es fundamentale physikalische Objekte (Substanzen) gibt; denn in Gestalt der räumlichen Relationen stehen konkrete physikalische Relationen zur Verfügung, um die Frage zu beantworten, was diese Objekte sind. Kurz gesagt: Der Atomismus wird zu einer starken naturphilosophischen Position, wenn er sich mit dem Strukturenrealismus verbündet. Wie eingangs erwähnt, alle experimentellen Befunde sind Befunde von Teilchen, und alle Messergebnisse reduzieren sich auf Ortsmessungen von Teilchen.²⁶

Dieses ist eine Konzeption von Objekten, die auf ihren eigenen Füßen steht: Sie ist eine Alternative sowohl zu der Sicht von Objekten als eigenschaftsloser Substrata als auch zu der

²⁴ Siehe insbesondere J. Ladyman, On the identity and diversity of objects in a structure, in: *Proceedings of the Aristotelian Society. Supplementary Volume* 81 (2007), 1–22.

²⁵ Siehe M. Esfeld, Quantum entanglement and a metaphysics of relations, in: *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 35 (2004), 601–617; M. Esfeld / V. Lam, Moderate structural realism about space-time, in: *Synthese* 160 (2008), 27–46.

²⁶ Vgl. J. S. Bell, *Speakable and unspeakable in quantum mechanics*, Cambridge 2004, 166.

Sicht von Objekten als Bündel intrinsischer Eigenschaften. Objekte und Relationen sind dieser Sicht zufolge wechselseitig ontologisch voneinander abhängig: Wie es keine Relationen ohne Objekte geben kann, die in den betreffenden Relationen stehen, so kann es auch keine Objekte geben, ohne dass diese durch bestimmte Relationen miteinander verbunden sind.²⁷ Wenn man daher die räumlichen Relationen zwischen den Materiepunkten entfernen würde, blieben nicht eigenschaftslose Substrata übrig, sondern es gäbe dann nichts mehr. Die strukturelle Individuation von Objekten ist daher eine Form von Holismus.²⁸ Diese Sicht führt insbesondere das aus, was Schaffer „die interne Verbundenheit aller Dinge“ nennt,²⁹ weil bestimmte Relationen – nämlich die räumlichen – die Essenz der fundamentalen physikalischen Objekte sind. Aber diese Sicht führt nicht zu einem Monismus:³⁰ Es gibt eine Vielzahl von Objekten, nämlich eine Vielzahl von Materiepunkten, die in räumlichen Relationen stehen. Es ist sinnvoll anzunehmen, dass deren Anzahl sehr groß, aber endlich ist.

Da die Existenz der Materiepunkte in den räumlichen Relationen aufgeht, in denen sie stehen, sind alle Materiepunkte gleich. Ihre Konfiguration ist permutationsinvariant: Einen Materiepunkt durch einen anderen auszutauschen macht keinen ontologischen Unterschied, weil es nichts an den räumlichen Relationen ändert. Nichtsdestoweniger ist es eine physikalisch gut begründete Annahme, dass sich im Universum jeder Materiepunkt von jedem anderen Materiepunkt durch einige der räumlichen Relationen unterscheidet, in denen er steht. Kurz gesagt: Durch seine Position in dem Netzwerk räumlicher Relationen unterscheidet sich jeder Materiepunkt von jedem anderen Materiepunkt, aber es ist irrelevant, welcher Materiepunkt die entsprechende Position einnimmt.

So konzipiert ist der Atomismus auch noch auf dem heutigen Stand der Forschung sowohl für die Metaphysik als auch für die Physik attraktiv: Die Theorie von Materiepunkten, deren Essenz allein die räumlichen Relationen sind, in denen diese Punkte stehen, ist eine fundamentale Ontologie der natürlichen Welt, die auf der einen Seite sehr einfach und maximal sparsam ist und auf der anderen Seite reich genug ist, um alle experimentellen Ergebnisse zu erklären.

IV. *Veränderung: dynamische Strukturen*

Zentral für die Erklärung der empirischen Phänomene ist die Veränderung in der Konfiguration der Atome. Ebenso wie die Atome unentstanden und unvergänglich sind (Substanzen), ist die Veränderung der räumlichen Relationen, in denen sie stehen, permanent. Durch Veränderung ergibt sich eine kontinuierliche Abfolge von Konfigurationen in räumlichen Relationen stehender Materiepunkte. Wie im vorigen Abschnitt erwähnt wurde, sieht der Leibnizsche Relationalismus die Zeit als die Ordnung dieser Abfolge an. Diese Ordnung ist eindeutig und gerichtet, so dass die Topologie der Zeit absolut ist, ihre Metrik hingegen relativ auf die Auswahl eines Untersystems innerhalb dieser Konfiguration ist, relativ auf das Zeit gemessen wird.

²⁷ Siehe M. Esfeld / V. Lam, *Ontic structural realism as a metaphysics of objects*, in: A. / P. Bokulich (Hgg.), *Scientific structuralism*, Dordrecht 2011, 143–159.

²⁸ Siehe dazu ausführlich M. Esfeld, *Holism in philosophy of mind and philosophy of physics*, Dordrecht 2001.

²⁹ J. Schaffer, *The internal relatedness of all things*, in: *Mind* 119 (2010), 341–376.

³⁰ Contra J. Schaffer, *Monism: the priority of the whole*, in: *Philosophical Review* 119 (2010), 31–76.

Die Aufgabe der Physik ist es dann, ein Gesetz für diese Veränderung zu formulieren, das heißt, ein Bewegungsgesetz für die Atome. Die erste zeitliche Ableitung des Ortes ist die Geschwindigkeit. Die Geschwindigkeit, die einem Materiepunkt zugesprochen wird, gibt an, wie sich die räumlichen Relationen, in denen dieser Materiepunkt zu anderen Materiepunkten steht, verändern. Aufgabe einer physikalischen Theorie ist es dementsprechend, ein Geschwindigkeitsfeld zu formulieren (Vektorfeld), das die Bewegung der Materiepunkte darstellt. Genau genommen muss man für jeden Übergang von einer universellen Materiekonfiguration zur nächsten ein Geschwindigkeitsfeld formulieren. So würde man jedoch nur zu einer endlosen Liste gelangen, die jeweils den Übergang von einer Materiekonfiguration zur nächsten angibt. Die Aufgabe, welche die physikalische Theorie zu lösen hat, ist daher diese: Gegeben eine beliebige universelle Materiekonfiguration (Orte der Materiepunkte in Form der räumlichen Relationen zwischen ihnen) ist das Ziel, ein Bewegungsgesetz in Form einer Differentialgleichung zu formulieren, so dass wenn man diese beliebige universelle Materiekonfiguration in die Gleichung einsetzt, man als Ergebnis den Übergang zu *allen* anderen Materiekonfigurationen erhält – das heißt, die *gesamte* zeitliche Entwicklung der universellen Materiekonfiguration. Hierin vergibt sich keine problematische metaphysische Voraussetzung eines universellen Determinismus. Es geht schlicht darum, eine Beschreibung der Veränderung der universellen Materiekonfiguration zu finden, die maximal einfach ist (Angabe der Materiekonfiguration zu einer Zeit als input) und zugleich maximal gehaltreich (Entwicklung der Materiekonfiguration zu aller Zeit als output). Ob dieses Ziel erreicht wird, ist dann eine empirische Frage. Jedenfalls lassen sich alle bisher bekannten Phänomene sowohl in der klassischen als auch in der Quantenphysik in Form physikalischer Theorien beschreiben, die dieser Anforderung genügen.

Um dieses Ziel zu erreichen, sind weitere Parameter erforderlich als diejenigen, die in der Ontologie bisher eingeführt wurden, nämlich nur räumliche Relationen zwischen Materiepunkten und deren Veränderung. Indem man konstante Parameter einführt – wie zum Beispiel Massen, Ladungen, gesamte Energie, verschiedene Naturkonstanten usw. – ebenso wie Parameter zu einer Anfangszeit, die sich dann verändern – wie zum Beispiel Anfangsgeschwindigkeiten, Impulse, Kräfte, Felder, Wellenfunktionen usw. –, erreicht man dieses Ziel: Diese Parameter werden allein zu dem Zweck eingeführt, dass einen Anfangswert von ihnen zu einer beliebigen Zeit zu spezifizieren und diesen Wert zusammen mit einer gegebenen Anfangskonfiguration von Materiepunkten in ein Bewegungsgesetz einzusetzen, es ermöglicht, die zeitliche Entwicklung der gegebenen Anfangskonfiguration von Materiepunkten zu bestimmen. Nennen wir die Parameter, die erforderlich sind, um dieses Ziel zu erreichen, die *dynamische Struktur* einer physikalischen Theorie.

Was die klassische Mechanik betrifft, so ist in Newtons Gravitationstheorie die zeitliche Entwicklung einer anfänglichen Teilchenkonfiguration eindeutig festgelegt durch die Angabe der Anfangsgeschwindigkeit, der Masse der Teilchen (Inertial- und gravitationelle Masse) und der Gravitationskonstante, wie diese Parameter in Newtons Gravitationsgesetz auftreten. Diese Parameter bilden die dynamische Struktur von Newtons Gravitationstheorie. Wie im vorigen Abschnitt erwähnt wurde, kann man eine entsprechende Gravitationstheorie ohne die Festlegung auf einen absoluten Raum und eine absolute Zeit formulieren.

Gleiches gilt für die Quantenphysik. Die Theorie, die auf de Broglie³¹ und Bohm³² zurückgeht und heute als Bohmsche Mechanik bekannt ist,³³ ist die prominenteste Version der Quantenphysik, die das Messproblem löst, indem sie den Quantenformalismus so ansieht, dass dieser auf eine Verteilung von Materie im dreidimensionalen Raum oder der vierdimensionalen Raumzeit Bezug nimmt. Um die Zeitentwicklung der Materie zu beschreiben, führt die Bohmsche Theorie zusätzlich zu der Schrödingergleichung, welche die Zeitentwicklung des Quantenzustands beschreibt, eine Führungsgleichung ein, in welcher der Quantenzustand (repräsentiert durch die Wellenfunktion) eingesetzt wird, um ein Geschwindigkeitsfeld zu erhalten, welches die Bewegung der Teilchen im dreidimensionalen Raum beschreibt. Wiederum gilt: Mit Hilfe zusätzlicher Parameter – hier der quantenmechanischen Wellenfunktion statt der Anfangsgeschwindigkeiten der Teilchen sowie neu zusätzlich dem Planckschen Wirkungsquantum – gelingt es, gegeben eine Anfangskonfiguration von Materiepunkten und Anfangswerte dieser zusätzlichen Parameter eingesetzt in die Bohmsche Führungsgleichung, die Zeitentwicklung der Anfangskonfiguration von Materiepunkten eindeutig zu bestimmen. Die Bohmsche Quantentheorie ist deterministisch ebenso wie die Newtonsche Mechanik. Wahrscheinlichkeiten folgen in beiden Theorien aus Ignoranz der exakten Anfangsbedingungen, an deren Stelle ein Postulat über typische Anfangsbedingungen tritt.

Die fundamentale Ontologie der Bohmschen Theorie ist die gleiche wie die der Newtonschen Mechanik: punktförmige Teilchen, allein charakterisiert durch deren Ort im Raum. Das Bewegungsgesetz ist allerdings ein anderes: Durch den spezifisch quantenphysikalischen Parameter der Wellenfunktion und deren Zeitentwicklung nimmt die Bohmsche Theorie die quantenphysikalischen Zustandsverschränkungen auf und leitet die experimentellen Voraussagen der Lehrbuch-Quantenmechanik her. Diese Tatsache sollte jedoch nicht zu der Fehldiagnose verleiten, dass die Bohmsche Mechanik dadurch motiviert ist, die Ontologie der klassischen Physik in die Quantenphysik hinüberzuretten. Die Motivation für die Teilchenontologie ist es, das Messproblem der Quantenphysik durch die Festlegung auf eine Verteilung von Materie im physikalischen Raum als Referenten des Quanten-Formalismus zu lösen. Anders ausgedrückt: Wenn man das Kind mit dem Bade ausschüttet – nämlich statt nur die dynamische Struktur der klassischen Mechanik durch eine spezifisch quantenmechanische dynamische Struktur zu ersetzen, auch die fundamentale Ontologie der klassischen Mechanik über Bord wirft –, dann folgt die Strafe auf den Fuß in Form des Messproblems der Quantenphysik. Generell gesagt: Was gleich bleibt im Wandel der physikalischen Theorien, das ist die fundamentale Ontologie des Atomismus, nämlich Materiepunkte, die allein durch die räumlichen Relationen, in denen sie stehen, und deren Veränderung charakterisiert sind. Was sich ändert, das sind unsere Versuche, eine dynamische Struktur zu formulieren, welche diese Veränderung in einer Weise erfasst, die zugleich maximal einfach und maximal reich an Informationsgehalt ist.

³¹ L. de Broglie, La nouvelle dynamique des quanta, in: *Electrons et photons. Rapports et discussions du cinquième Conseil de physique tenu à Bruxelles du 24 au 29 octobre 1927 sous les auspices de l'Institut international de physique Solvay*, Paris 1928, 105–132.

³² D. Bohm, A suggested interpretation of the quantum theory in terms of 'hidden' variables, in: *Physical Review* 85 (1952), 166–193.

³³ Siehe D. Dürr / S. Goldstein / N. Zanghì, *Quantum physics without quantum philosophy*, Berlin 2013.

Das gilt auch für die Quantenfeldtheorie: Insofern es Ansätze zu einer Ontologie der Quantenfeldtheorie gibt, sind auch Ansätze entwickelt, welche die experimentellen Voraussagen dieser Theorie aus einer Ontologie permanenter Teilchen und eines deterministischen Bewegungsgesetzes dieser Teilchen herleiten.³⁴ Schließlich stehen für eine relationalistische Formulierung der Bohmschen Quantentheorie die gleichen beiden Strategien offen, wie für eine relationalistische Formulierung der klassischen Mechanik; insbesondere gibt es Ansätze, Barbour's Programm, die Mechanik allein von einer Ontologie punktförmiger Teilchen und der räumlichen Relationen zwischen diesen aus zu formulieren, auf die Bohmsche Quantenphysik zu übertragen.³⁵

Es ist in diesem Zusammenhang irrelevant, dass die klassische Mechanik in der Regel als eine Theorie zweiter Ordnung formuliert wird – das Bewegungsgesetz beschreibt die zeitliche Entwicklung der Geschwindigkeit der Teilchen mit Beschleunigung als der zweiten zeitlichen Ableitung des Ortes –, während die Bohmsche Mechanik als eine Theorie erster Ordnung konzipiert ist – das Bewegungsgesetz beschreibt die zeitliche Entwicklung des Ortes der Teilchen mit Geschwindigkeit als der ersten zeitlichen Ableitung des Ortes (es gibt allerdings auch eine Formulierung dieser Theorie von Bohm selbst als Theorie zweiter Ordnung)³⁶. In beiden Fällen geht es ausschließlich darum, die Veränderung der räumlichen Relationen zwischen den Materiepunkten zu erfassen. Welche dynamischen Parameter dazu eingesetzt werden und wie diese in einem Bewegungsgesetz verbunden werden, ist eine Frage der mathematischen Physik, aber nicht der Ontologie und Naturphilosophie. Auch wenn man davon überzeugt ist, dass das Bewegungsgesetz in der Natur verankert ist, so doch sicher nicht seine mathematische Darstellung als Differentialgleichung erster Ordnung oder Differentialgleichung zweiter Ordnung.

Das Bewegungsgesetz ist in jedem Fall für die Materiekonfiguration des Universums als Ganze formuliert, und es ist alles andere als eine triviale Angelegenheit, aus diesem Bewegungsgesetz in der klassischen oder der Quantenphysik Voraussagen über das Verhalten eng eingegrenzter Untersysteme herzuleiten, die im Labor überprüft werden können (aber das ist ein mathematisches und kein philosophisches Problem). Philosophisch relevant ist, dass, um die korrekte Geschwindigkeit für einen beliebigen Materiepunkt zu erhalten, man strikte genommen dessen räumliche Beziehungen zu *allen* anderen Materiepunkten berücksichtigen müsste. Das heißt: Auch wenn die fundamentale Ontologie atomistisch ist, ist ein dynamischer Holismus unausweichlich. Ferner werden dann, wenn die Materiepunkte durch räumliche Relationen charakterisiert sind, auch die fundamentalen Objekte bereits holistisch individuiert. Folglich ist der Unterschied zwischen klassischer und Quantenphysik keineswegs der zwischen einer atomistischen und einer holistischen Dynamik. Der Unterschied ist dieser: Die quantenmechanische Wellenfunktion ist für die gesamte Materiekonfiguration definiert. Sie korreliert die Bewegung jedes Materiepunktes mit anderen Materiepunkten, strikte genommen *allen* anderen Materiepunkten, *ohne dass die Stärke dieser*

³⁴ Siehe insbesondere S. Colin / W. Struyve, A Dirac sea pilot-wave model for quantum field theory, in: *Journal of Physics A* 40 (2007), 7309–7341; D.-A. Deckert, *Electrodynamical absorber theory – a mathematical study*, Tönning 2010, Kapitel 6 und 7.

³⁵ Siehe A. Vassallo, Can Bohmian mechanics be made background independent?, in: *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 49 (2015), DOI 10.1016/j.shpsb.2015.08.005.

³⁶ D. Bohm, A suggested interpretation of the quantum theory in terms of 'hidden' variables, in: *Physical Review* 85 (1952), 166–193.

Korrelation von dem räumlichen Abstand zwischen den betreffenden Materiepunkten abhängen muss. Man kann daher sagen, dass der dynamische Holismus in der Quantenmechanik stärker hervorsteht als in der klassischen Mechanik: In der Quantenmechanik gibt es einen dynamischen Parameter – die Wellenfunktion –, der die Bewegung im Prinzip aller Teilchen miteinander korreliert. In der klassischen Mechanik schreibt man hingegen dynamische Parameter den Teilchen einzeln genommen zu und rechnet ihre korrelierte Bewegung je paarweise aus, in Abhängigkeit des räumlichen Abstands zwischen den beiden betrachteten Teilchen, statt für alle in Erwägung gezogenen Teilchen zusammengenommen, wie im Falle der quantenmechanischen Zustandsverschränkungen.

V. *Räumliche und dynamische Struktur*

Die räumliche Struktur ist permutationsinvariant: Eine Vertauschung von Materiepunkten verändert nicht die räumlichen Relationen zwischen diesen Punkten. Die dynamische Struktur ist hingegen nicht permutationsinvariant. Die Materiepunkte unterscheiden sich in ihrer Geschwindigkeit, das heißt, in ihren Teilchenbahnen. Daher kann die dynamische Struktur die Materiepunkte in verschiedene Teilchenarten aufteilen. Manche Materiepunkte bewegen sich wie geladene Teilchen, andere wie leichte oder schwere Teilchen usw., so dass sie als Elektronen, Protonen, Neutronen etc. beschrieben werden können. Eine Vertauschung der Geschwindigkeiten der Teilchen führt daher offensichtlich zu einer neuen physikalischen Situation. Es wäre jedoch verfehlt, aus dieser Tatsache zu schließen, dass manche Materiepunkte intrinsisch Elektronen sind, andere wiederum intrinsisch Protonen oder intrinsisch Neutronen etc.³⁷ Der Grund ist, dass die dynamische Struktur für die Materiekonfiguration als Ganze definiert ist.

Auch wenn eine physikalische Theorie dynamische Parameter so einführt, dass ein Wert dieser Parameter den Materiepunkten je einzeln zugeschrieben wird, werden diese Parameter durch ihre Rolle in einer dynamischen Struktur definiert, die ein Geschwindigkeitsfeld für die Materiekonfiguration als Ganze spezifiziert. Es gibt keinen inneren Unterschied zwischen Naturkonstanten wie zum Beispiel der Newtonschen Gravitationskonstante oder dem Planckschen Wirkungsquantum und Parametern wie der inertiellen oder der gravitationellen Masse, die den Teilchen je einzeln zugeschrieben werden. Alle diese Größen treten allein deshalb in einer physikalischen Theorie auf, weil sie es ermöglichen, Werte von ihnen in einer Differentialgleichung so miteinander zu verbinden, dass gegeben eine Anfangskonfiguration von Materiepunkten die zeitliche Entwicklung dieser Konfiguration eindeutig bestimmt ist. So werden in der Newtonschen Gravitationstheorie die gravitationelle Masse und die Gravitationskonstante eingeführt, um zusammen eine Kraft oder ein Potential zu bestimmen, das eine dynamische Relation zwischen den Teilchen ausdrückt, nämlich die Entwicklung ihrer Relativgeschwindigkeiten.

Es ist daher eine fehlgeleitete Metaphysik, wenn man einige dieser Größen in den Stand intrinsischer Eigenschaften der Materiepunkte erhebt. Alles, was es gibt und was experimentell nachweisbar ist, das ist die Veränderung der räumlichen Relationen zwischen materiellen Objekten. Um diese Veränderung zu verstehen, sind dynamische Relationen erforderlich, welche die Weise erfassen, in der die räumlichen Beziehungen zwischen den Materiepunkten sich verändern. Kurz gesagt: Räumliche Struktur, welche die physikalischen

³⁷ Siehe M. Esfeld / D. Lazarovici / V. Lam / M. Hubert, *The physics and metaphysics of primitive stuff*, in: *The British Journal for the Philosophy of Science* 66 (2015), DOI 10.1093/bjps/axv026.

Objekte individuiert, und dynamische Struktur, welche die Veränderung von deren räumlichen Relationen erfasst, ist alles, was zum Verständnis des Universums erforderlich ist.

Wir versuchen, die dynamische Struktur durch verschiedene Parameter zu erfassen, die von Theorie zu Theorie variieren, ebenso wie wir die räumliche Struktur zu erfassen versuchen, indem wir zum Beispiel einen euklidischen oder einen Riemannschen Raum konzipieren, in den eingebettet wir die Materiekonfiguration darstellen. Ebenso wenig wie dieser geometrische Raum als ein absoluter Raum in der Welt existiert, so existieren die dynamischen Parameter, welche die verschiedenen physikalischen Theorien einführen, in der Welt. Beides sind unsere Mittel, um die Materiekonfiguration und deren Veränderung darzustellen. Und ebenso wie die Verdinglichung des Raumes in die Sackgasse führt, die Frage beantworten zu müssen, wodurch sich ein leerer von einem mit Materie besetzten Raumpunkt unterscheidet, so führt die Heraufstufung dynamischer Parameter zu intrinsischen Eigenschaften der fundamentalen physikalischen Objekte in die Sackgasse, die Frage beantworten zu müssen, wie ein physikalisches Objekt zu anderen physikalischen Objekten herausreichen kann und deren Bewegung durch Eigenschaften verändern kann, die diesem Objekt intrinsisch sind. Der Versuch, diese Frage zu beantworten, führt dann häufig zu Sichtweisen wie der, dass von einem Objekt Kräfte ausgehen, die sich als eine Art Agenten im Raum ausbreiten und dadurch ein Teilchen die Bewegung anderer Teilchen verändert. Solche Sichtweisen sind zu Recht von Russell und anderen als Anthropozentrismus zurückgewiesen worden, der mit der modernen Physik nichts zu tun hat.³⁸ Wenn es hingegen nur dynamische Relationen zwischen den Materiepunkten gibt, dann besteht kein Problem, deren Interaktion zu verstehen: Diese ist dann automatisch durch die dynamischen Relationen gegeben, in denen die Materiepunkte stehen.

Was diese dynamischen Relationen betrifft – und damit die dynamische Struktur einer physikalischen Theorie –, so kann man zwei Haltungen einnehmen: Gemäß dem bereits erwähnten Humeanismus sind die dynamischen Parameter nur unsere Kreationen, um die Veränderung in den räumlichen Relationen zwischen den materiellen Objekten auf eine möglichst effiziente Art und Weise zu beschreiben. Es gibt in der Welt nur die räumlichen Relationen und deren Veränderung, aber nichts, das diese Veränderung determiniert (auch wenn die physikalische Theorie deterministisch ist – das ist, wie ebenfalls bereits erwähnt, lediglich die eleganteste mathematische Lösung für das Problem erreicht, die Veränderung dieser Relationen auf eine Weise zu beschreiben, die maximal einfach und zugleich maximal informativ ist). Auf der anderen Seite vertreten die meisten ontischen Strukturenrealisten, dass es in der Welt eine dynamische Struktur gibt, die modal ist, das heißt, festlegt, wie die Veränderung in der Materiekonfiguration ablaufen kann bzw. nicht ablaufen kann (im deterministischen Fall: genau eine Weise festlegt, wie die Veränderung einer gegebenen Materiekonfiguration ablaufen muss, wenn eine bestimmte dynamische Struktur in der Welt besteht).³⁹ Das besagt nicht, dass die jeweiligen dynamischen Parameter, welche eine physikalische Theorie einführt, in der Welt existieren. Das besagt aber, dass diese Parameter

³⁸ Siehe B. Russell, On the notion of cause, in: *Proceedings of the Aristotelian Society* 13 (1912), 1–26.

³⁹ Siehe M. Esfeld, The modal nature of structures in ontic structural realism, in: *International Studies in the Philosophy of Science* 23 (2009), 179–194; S. R. D. French, *The structure of the world. Metaphysics and representation*, Oxford 2014, Kapitel 9 und 10. Für eine Anwendung dieser Sicht auf die Bohmsche Quantentheorie siehe M. Esfeld / D. Lazarovici / M. Hubert / D. Dürr, The ontology of Bohmian mechanics, in: *The British Journal for the Philosophy of Science* 65 (2014), 773–796.

unser Versuch sind, eine dynamische Struktur, die es objektiv in der Welt über die räumliche Struktur hinaus gibt und die deren Veränderung bestimmt, zu erfassen. Es ist eine offene Frage, ob sich diese beiden Haltungen in unterschiedliche Konsequenzen in der Formulierung physikalischer Theorien übersetzen lassen, die dann letztlich empirisch überprüfbar wären. Jedenfalls ist inzwischen klar, dass auch die quantenmechanische Wellenfunktion – und damit die quantenmechanischen Zustandsverschränkungen – im Rahmen des Humeanismus verstanden werden können: Um das Messproblem zu lösen, ist sowieso eine primitive, besser fundamentale Ontologie einer Materieverteilung im Raum erforderlich (wie zum Beispiel Teilchenorte in der Bohmschen Mechanik). Aber dann kann der Humeaner vertreten, dass diese die vollständige Ontologie ist und alles weitere, einschließlich der Wellenfunktion, lediglich von uns eingeführte Parameter sind, um die Entwicklung der räumlichen Materieverteilung auf eine möglichst effiziente Weise zu beschreiben.⁴⁰

⁴⁰ Diese Sicht wurde von folgenden Autoren unabhängig voneinander ausgearbeitet: E. Miller, Quantum entanglement, Bohmian mechanics, and Humean supervenience, in: *Australasian Journal of Philosophy* 92 (2014), 567–583; M. Esfeld, Quantum Humeanism, or: physicalism without properties, in: *The Philosophical Quarterly* 64 (2014), 453–470; C. Callender, One world, one beable, in: *Synthese* 193 (2015), DOI 10.1007/s11229-014-0582-3; H. Bhogal / Z. R. Perry, What the Humean should say about entanglement, in: *Noûs* 49 (2015), DOI 10.1111/nous.12095.