

Kopenhagen contra Bohm – eine Herausforderung für den Realismus?

Stephan Hartmann und Rainer Müller*

1 Realismus, Unterbestimmtheit und die Quantenmechanik

Der bedeutende amerikanische Logiker und Philosoph W.V.O. Quine (geb. 1908) hat die folgende Frage ins Zentrum seines Schaffens gestellt [16]: „Wie kommen wir von unseren Sinnesdaten zu Theorien über die Welt?“ Bei der Beantwortung dieser Frage tritt ein grundlegendes Problem auf, das damit zusammenhängt, daß uns immer nur ein endlicher Satz an Informationen über die Welt zugänglich ist. Jedes Experiment liefert z. B. nur eine endliche Anzahl von Meßpunkten (Abb. 1 (a)).

Von einer guten wissenschaftlichen Theorie wird erwartet, daß sich diese Daten aus ihr deduzieren lassen. Darüber hinaus macht die Theorie aber auch noch Aussagen über den Bereich zwischen den Datenpunkten. Das erwähnte Problem tritt nun auf, wenn man fragt, welches die „richtige“ Theorie ist. Denn zu jedem endlichen Datensatz ist eine Vielzahl von Theorien denkbar, welche die Daten gleich gut beschreiben.

Im betrachteten Fall legen Einfachheitsüberlegungen sicher nahe, eine Gerade durch die Punkte zu legen, wie dies in Abb. 1 (b) geschehen ist. Allerdings scheinen die experimentellen Daten auch eine Theorie zu bestätigen, die die in Abb. 1 (c) dargestellte Kurve liefert. Es gibt noch unendlich viele weitere Kurven (und damit auch Theorien), welche die Daten ebenfalls exakt reproduzieren. Dies ist ein Beispiel für das, was Philosophen die „Unterbestimmtheit von Theorien durch die Daten“ nennen. Abkürzend spricht man auch einfach von der Unterbestimmtheitsthese.

Diese Bemerkung provoziert sofort die Frage, welche Theorie denn nun die „richtige“ oder die „wahre“ ist. Mit einer solchen Frage benutzt man bereits ein realistisches Vokabular. Und tatsächlich kommen Vertreter des *wissenschaftlichen Realismus* durch die Unterbestimmtheitsthese in gewisse Schwierigkeiten. Um dies zu erläutern, muß zunächst die Position eines Realisten umrissen werden. Zwei Thesen scheinen hier zentral zu sein:

1. Wissenschaftliche Theorien haben einen Wahrheitswert, sie sind also entweder wahr oder falsch und nicht allein nützliche Instrumente zum Zweck der Vorhersage, wie die Instrumentalisten meinen.

*Ein leicht erweiterte Versions dieses Aufsatzes erschien in *Praxis der Naturwissenschaften – Physik*, Heft 4, 12–17 (1999)

2. Die Terme einer Theorie beziehen sich auf Relata in der Wirklichkeit. Das bedeutet: Wenn gut bestätigte wissenschaftliche Theorien behaupten, daß es Elektronen gibt, dann existieren diese tatsächlich.

Warum stellt nun die Unterbestimmtheitsthese ein Problem für den wissenschaftlichen Realisten dar? Falls es, wie diese These nahelegt, zu jeder Theorie beliebig viele gleich gut bestätigte Alternativtheorien gibt, ist offenbar nicht mehr klar, inwiefern es sinnvoll ist, eine davon als die „wahre“ zu bezeichnen. Solche Probleme treten für einen Vertreter der Gegenposition, dem Instrumentalismus, nicht auf. Eine Theorie wird hier allein nach ihrer Nützlichkeit für bestimmte Zwecke (Vorhersage etc.) bewertet.

Der wissenschaftliche Realist muß den Wahrheitsanspruch einer Theorie begründen. Dies geschieht oft durch zusätzliche Kriterien der Theorienwahl. Ist es nicht so, argumentiert der Realist, daß wir noch mehr von einer Theorie erwarten, als ihre empirische Adäquatheit? Recht unkontrovers ist die Forderung, daß wissenschaftliche Theorien logisch konsistent sein sollen. Widersprüchliche Theorien sind also zu verwerfen.¹

Das ist aber schon das einzige Kriterium, das allgemeine Zustimmung findet. Zu den „weichen“ Kriterien gehören z. B. Einfachheit, Schönheit, die Verständlichkeit einer Theorie und die Kohärenz mit anderen Theorien. Bei diesen Kriterien stellt sich für den Realisten jedoch das Problem, zu begründen, warum die Welt einfach oder schön sein soll. Vielleicht *ist* die Welt ja in Wirklichkeit gerade nicht einfach, sondern extrem kompliziert. In diesem Falle sollten unsere realistisch verstandenen Theorien dem Rechnung tragen.

Das in diesem Zusammenhang vielleicht stärkste Argument für die Realisten kommt aus der Geschichte der Physik. Es hat sich nämlich gezeigt, daß es nur sehr selten interessante alternative physikalische Theorien gab. Der Feyerabendische Theorienpluralismus wird damit, zum Leidwesen seines Erfinders, allein zum Wunschtraum eines Philosophen. Falls es Alternativen gab, ließ sich gewöhnlich leicht die Überlegenheit einer der beiden Konkurrenten begründen. Und so hatten die Realisten ein leichtes Spiel, die meist formalen Argumente für die Unterbestimmtheitsthese als haarspalterische Spekulationen zurückzuweisen.

Instrumentalisten können an dieser Stelle jedoch erwidern, daß es möglicherweise historische Zufälligkeiten („Kontingenzen“) oder soziologische und pragmatische Faktoren waren, die die Theoriwahl begünstigten. Unterstützung hat dieser Einwand kürzlich von dem amerikanischen Physiker und Wissenschaftsphilosophen James Cushing bekommen. Dieser hat in seinem Buch „Quantum Mechanics: Historical Contingency and the Copenhagen Hegemony“ [6] einen Vorschlag für die *tatsächliche* Unterbestimmtheit von Theorien vorgelegt. Sein Beispiel behandelt nicht irgendeine unbedeutende physikalische Theorie, sondern *die* zentrale Theorie der zeitgenössischen Physik: die Quantenmechanik. Am Beispiel des Konfliktes zwischen der *Kopenhagener* und der *Bohmschen* Version der Quantenmechanik zeigt Cushing, daß die Unterbestimmtheitsthese nicht ins Reich sinnlosen philosophischen Spekulierens gehört.

Cushing versucht nachzuweisen, daß beide Versionen der Quantenmechanik zwar empirisch vollkommen äquivalent (also ununterscheidbar) sind, aber erheblich in ihren *ontologischen* Aussagen differieren. Während die Kopenhagener Version die Quantenwelt

¹Eine Ausnahme ist hier P. Feyerabend, vgl. [11], S. 240.

als indeterministisch und akausal auffaßt, unterscheidet sich die Welt à la Bohm nicht entscheidend von der gewohnten Welt der klassischen Physik. Teilchen bewegen sich hier nach wie vor auf Bahnen, die sich aus deterministischen Gleichungen berechnen lassen.

Ein größerer Gegensatz zweier Theorien ist kaum vorstellbar! Das Problem für den wissenschaftlichen Realisten ist damit klar: Es gibt zwei gleichermaßen gut bestätigte physikalische Theorien, die empirisch vollkommen äquivalent sind und sich folglich durch Experimente und Beobachtungen nicht unterscheiden lassen, die aber gänzlich verschiedene Aussagen über die physikalische Wirklichkeit machen. Der Realist möchte wissen, wie die Welt wirklich beschaffen ist und gerät damit in Probleme – zumindest dann, wenn man Cushings Voraussetzung akzeptiert, daß nur die harten Kriterien der Theoriwahl wirklich zählen: empirische Adäquatheit und logische Konsistenz.

Wir wollen in diesem Aufsatz zeigen, wie ein Realist auf Cushings Herausforderung reagieren kann. Dazu werden wir in Abschnitt 3 ein weiteres Kriterium vorschlagen, welches es erlaubt, eine vernünftige Entscheidung zwischen beiden Theorien zu treffen. Die Plausibilität dieses Kriteriums wird in Abschnitt 4 an Beispielen aus der Physikgeschichte überprüft.

2 Zwei Interpretationen der Quantenmechanik

Bevor wir das Problem näher analysieren, das die Existenz zweier empirisch äquivalenter Varianten der Quantenmechanik für den Realisten bildet, soll zunächst ein näherer Blick auf den physikalischen Gehalt der beiden konkurrierenden Versionen geworfen werden.

(a) Die Kopenhagener Version der Quantenmechanik

Wahrscheinlich bekennt sich heute der Großteil der Physiker zur Kopenhagener Interpretation der Quantenmechanik. Sie hat ihren Namen von der Wirkungsstätte Niels Bohrs, der seine dänische Heimatstadt in der ersten Hälfte dieses Jahrhunderts zum Zentrum der damals noch jungen Quantenmechanik machte. Neben Bohr selbst zählen noch Werner Heisenberg und Wolfgang Pauli zu den Begründern und Vertretern der Kopenhagener Interpretation. Inzwischen hat der Ausdruck „Kopenhagener Interpretation“ zwar teilweise einen Bedeutungswandel erfahren und steht in gewisser Weise auch für eine Vielzahl von Interpretationsvarianten. Dennoch lassen sich die folgenden fünf Kernaussagen herauschälen (siehe z. B. [6, 15, 17]):

1. Die Unverzichtbarkeit klassischer Begriffe. Diese ergibt sich aus der Bohrschen Einsicht, daß uns die Darstellung aller Erfahrung immer nur in klassischen Begriffen möglich ist.
2. Das Phänomen der Komplementarität, das sich etwa im Doppelspalt-Experiment manifestiert.
3. Die Ganzheitlichkeit der Quantenphänomene. Diese zeigt sich z. B. im berühmten Gedankenexperiment von Albert Einstein, Boris Podolsky und Nathan Rosen [9] und wird nicht zuletzt in Bohrs Antwort auf diese Arbeit [2] klar beschrieben.

4. Die Aufgabe des Determinismus. Diese drückt sich in der fundamentalen Rolle von Wahrscheinlichkeiten (Bornsche Interpretation) in der Quantentheorie aus. Damit hängt auch die Aufgabe des Bahnbegriffs der klassischen Mechanik zusammen, die Heisenberg aus einer Analyse der Unbestimmtheitsrelation abgeleitet hat.
5. Die Vollständigkeit der Quantenmechanik. Diese läßt keinen Raum für zusätzliche (verborgene) Parameter.

Eine typische Aussage der Kopenhagener Interpretation läßt sich am Doppelspalt-Experiment mit Elektronen aufzeigen (vgl. z. B. [14]): Versucht man durch Lichtstreuung hinter den beiden Spalten festzustellen, durch welchen Spalt ein Elektron gerade gegangen ist, so zeigt sich kein Interferenzmuster auf dem Schirm. Jede Manipulation der Versuchsanordnung, die eine Bestimmung des Ortes eines Elektrons ermöglicht, verändert den Ausgang des Experimentes. Bohr deutet dies so, „daß kein Ergebnis eines Experimentes über ein im Prinzip außerhalb des Bereiches der klassischen Physik liegenden Phänomen dahin gedeutet werden kann, daß es Aufschluß über unabhängige Eigenschaften der Objekte gibt; es ist vielmehr unlöslich mit einer bestimmten Situation verbunden, in deren Beschreibung auch die mit den Objekten in Wechselwirkung stehenden Meßgeräte als wesentliches Glied eingehen“ ([3], S. 24). Für das Doppelspalt-Experiment bedeutet das: Die Eigenschaft „Ort“ kann einem Elektron nicht unabhängig von einer Ortsmessung zugesprochen werden; unabhängig von einer Messung *hat* ein Elektron keinen Ort.

(b) Die Bohmsche Version der Quantenmechanik

Seit der Formulierung der Quantenmechanik fiel es einer großen Zahl von Physikern (darunter nicht zuletzt Albert Einstein und Erwin Schrödinger) schwer, sich mit den weitreichenden Folgen der Kopenhagener Interpretation abzufinden. So spiegelt etwa Einsteins berühmter Ausspruch „Der Alte würfelt nicht“ ein tiefes Unbehagen darüber wider, daß das Ergebnis eines physikalischen Messprozesses vom „Zufall“ abhängen sollte. Einstein selbst war der festen Überzeugung, daß die grundlegenden Gesetze der Physik deterministischer Natur sind, d. h., daß die Zukunft eines Systems (bei gegebenen Naturgesetzen) eindeutig durch seinen Zustand zu einem beliebigen Zeitpunkt in der Vergangenheit bestimmt ist.

Auf der Suche nach einer derartigen deterministischen Alternative zur Quantenmechanik wurden zuweilen *Theorien mit verborgenen Parametern* ins Spiel gebracht. Dabei handelt es sich um Modifikationen der Quantentheorie, bei denen der Zustand eines Quantenobjektes durch die Wellenfunktion noch nicht eindeutig bestimmt ist. Es gibt hier zusätzliche Variablen, die z. B. beim Doppelspalt-Experiment schon im voraus festlegen, durch welchen Spalt ein bestimmtes Elektron gehen wird.

Theorien mit verborgenen Parametern wurden bereits von Erwin Madelung (1926) und Louis de Broglie (1927) vorgeschlagen. Nach heftiger (und wie sich später herausstellte: unberechtigter) Kritik aus dem Kopenhagener Lager (vor allem von Pauli) wurden diese Ansätze wieder verworfen und gerieten weitgehend in Vergessenheit. Darüber hinaus schienen ein (wie wir heute wissen: fehlerhafter) „Beweis“ des großen Mathematikers John von Neumanns zu zeigen, daß Theorien mit verborgenen Parametern nicht zu den gleichen Aussagen wie die hervorragend bestätigte Quantenmechanik führen können. Erst im Jahr

1952 zeigte David Bohm [4] durch explizite Konstruktion einer solchen Theorie, daß der von Neumannsche Beweis offensichtlich nicht ganz korrekt sein konnte.

David Bohm verfolgte ein radikal anderes Programm als ‘die Kopenhagener’. Die von ihm vorgeschlagene Theorie ist vollkommen *deterministisch*; Quantenobjekte, wie etwa die Elektronen, verhalten sich demnach wie ganz gewöhnliche klassische Teilchen. Sie haben zu jedem Zeitpunkt einen festen Ort und auch der *Bahn*begriff der Newtonschen Mechanik kann weiterhin beibehalten werden.

Wie ist dies möglich? In Bohms Theorie behält die Schrödingergleichung nach wie vor ihre Funktion als grundlegende dynamische Gleichung für die Wellenfunktion ψ des betreffenden Systems. Allerdings erhält die Wellenfunktion noch eine andere Funktion. Sie wirkt nun auch als „Führungsfeld“ für die Teilchen.

Dies sieht man wie folgt: Zunächst spaltet man die Wellenfunktion in Betrag und Phase auf:

$$\psi = R \exp(iS/\hbar). \quad (1)$$

Setzt man diesen Ansatz in die Schrödingergleichung ein und betrachtet den Real- und den Imaginarteil separat, so erhält man zwei Gleichungen für die beiden Größen R und S . Bei der einen handelt es sich um die *Kontinuitätsgleichung* für die Wahrscheinlichkeitsdichte $|\psi|^2 = R^2$, die andere kann als *Hamilton-Jacobi-Gleichung* für die Größe S aufgefaßt werden. Wie in der klassischen Hamilton-Jacobi-Theorie bestimmt S das Geschwindigkeitsfeld der Teilchen:

$$\vec{v} = \vec{\nabla}S/m \quad (2)$$

Im Unterschied zur klassischen Mechanik tritt jedoch noch ein zusätzlicher nicht-klassischer Potentialterm auf, den man das „Quantenpotential“ nennt:

$$U = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\nabla^2 R}{R} \quad (3)$$

Das Quantenpotential beeinflusst die Bewegung der Teilchen zusätzlich zum gewöhnlichen „klassischen“ Potential V .

Dies kann wieder am Beispiel des Doppelspalt-Experiments erläutert werden. Abbildung 2 zeigt, wie das Interferenzmuster durch die Häufung der Teilchenbahnen am Ort der Maxima nach der Bohmschen Theorie zustande kommt.

Offenbar knüpft die Bohmsche Theorie sehr gut an unsere klassischen Intuitionen an. Bei vorgegebenen Anfangsbedingungen (Orte und Impulse der Teilchen) ergibt sich eine wohlbestimmte Teilchenbahn. Darüber hinaus gelingt die Reproduktion der statistischen Aussagen Quantenmechanik, da die verborgenen Parameter (im Falle der Bohmschen Theorie sind dies gerade die Orte der Teilchen) in einem Experiment nicht gezielt präparierbar und kontrollierbar sind, so daß über sie gemittelt werden muß. Bohm hat nachgewiesen, daß eine solche Mittelungsprozedur dazu führt, daß $|\psi(x, t)|^2$ die Wahrscheinlichkeitsverteilung für die Teilchenorte darstellt, sofern diese zu einem Anfangszeitpunkt durch $|\psi(x, 0)|^2$ gegeben war. Damit ist die Konsistenz der Bohmschen Theorie nachgewiesen.

Gegenüber der Kopenhagener Variante der Quantenmechanik hat die Bohmsche Theorie Vorzüge und Nachteile. Ein großer Vorzug der Bohmschen Theorie besteht sicherlich darin, daß die bedeutenden Schwierigkeiten bei der Beschreibung des Meßprozesses nicht

aufzutreten (vgl. dazu [18]). Störend wird von vielen Physikern allerdings das explizite Auftreten von *Fernwirkungen* in der Bohmschen Theorie empfunden, d. h. von nicht-lokalen Kräften, die instantan über beliebig große Distanzen wirken. Ein Ereignis (z. B. das Schließen eines Spaltes beim Doppelspalt-Experiment) hat demnach unmittelbare Wirkungen auf alle Punkte im ganzen Raum, egal wie weit entfernt sich diese von der Experimentalanordnung befinden. Schließlich kann die Bohmsche Mechanik auch nicht immer beanspruchen, eine „anschaulichere“ Beschreibung der Vorgänge im Quantenbereich zu geben. Konkrete Modellrechnungen [10] zeigen, daß den Bohmschen Bahnen zuweilen geradezu „surreale“ Eigenschaften zukommen.

3 Ontologie und Theorienauswahl

Kommen wir nun auf die am Anfang gestellte Frage zurück, ob der Konflikt zwischen der Kopenhagener und der Bohmschen Version der Quantenmechanik ein konkretes Beispiel für die Unterbestimmtheitsthese darstellt. Im Falle einer positiven Antwort ist darüber hinaus zu klären, ob dieser Sachverhalt als Einwand gegen den wissenschaftlichen Realismus verwendet werden kann. In diesem Zusammenhang gilt es insbesondere zu untersuchen, ob es ein überzeugendes Kriterium gibt, das eine *begründete Entscheidung* für eine der beiden Varianten ermöglicht.

Dazu muß zunächst gefragt werden, ob „Kopenhagen“ und „Bohm“ wirklich empirisch äquivalent sind. Tatsächlich enthält „Bohm“ alle empirischen Konsequenzen von „Kopenhagen“, da beide Theorien die Schrödinger-Gleichung beinhalten, die allein die experimentell relevanten Wahrscheinlichkeitsaussagen liefert. Unklar ist jedoch, ob es „Kopenhagen“ vermag, alle möglichen experimentellen Konsequenzen der Bohmschen Theorie wiederzugegeben. Denn schließlich enthält „Bohm“ eine *zusätzliche theoretische Struktur*, nämlich Aussagen über die Orte und Bahnen der betreffenden Teilchen, die prinzipiell beobachtbare Auswirkungen haben *können*.

Tatsächlich haben verschiedene Anhänger der Bohmschen Theorie Vorschläge für Effekte gemacht, die nicht aus der Kopenhagener Quantenmechanik folgen. Dazu gehören z. B. Berechnungen von Tunnelzeiten bei zerfallenden Atomkernen und Details von Streuprozessen. Zur Zeit gibt es jedoch keine experimentellen Hinweise auf einen möglichen größeren empirischen Gehalt der Bohmschen Theorie. Beide Theorien sind deshalb in einem *pragmatischen Sinne* empirisch äquivalent. Um Cushings Argument weiter diskutieren zu können, gehen wir im folgenden jedoch von der Voraussetzung aus, daß „Kopenhagen“ und „Bohm“ vollkommen empirisch äquivalent sind.

Wir kommen damit zur Frage, ob diese (angenommene) empirische Äquivalenz zweier Theorien mit vollständig anderer Ontologie den wissenschaftlichen Realisten zum Rückzug zwingt. Der Realist mag zunächst erwidern, daß beide Theorien im strengen Sinne wahrscheinlich falsch sind; es handelt sich um vorläufige Konstrukte, die irgendwann einmal der „wahren“ Theorie Platz machen werden. Es wird also vorgeschlagen, die Quantenmechanik allein instrumentalistisch zu deuten; dennoch kann eine künftige Theorie durchaus den Anspruch erheben, wahr im Sinne des Realismus zu sein. Eine solche Option auf die Zukunft ist jedoch argumentativ ein wenig problematisch und so wollen wir im

folgenden untersuchen, auf welche Weise sich eine der beiden Theorien als die für einen Realisten akzeptablere erweisen kann.

Dazu prüfen wir, ob es wirklich – wie Cushing im Einklang mit seiner instrumentalistischen Grundposition meint – keine weiteren Auswahlkriterien außer dem Kriterium der logischen Konsistenz und dem der empirischen Adäquatheit gibt, für die der Realist argumentieren kann. Wir werden ein Kriterium vorschlagen, welches strengere Maßstäbe an eine mögliche Ontologie legt und *beliebige* Ontologien ausschließt.

Dazu könnte man etwa fordern, daß unbeobachtbare Entitäten aus wissenschaftlichen Theorien zu eliminieren sind, wie dies einige Vertreter des Logischen Empirismus vorgeschlagen haben. Diese Forderung erwies sich jedoch schon bald als zu restriktiv und mußte deshalb schnell wieder verworfen werden. So basieren z. B. viele moderne physikalische Theorien auf der Annahme von Entitäten, die nicht *direkt* beobachtbar sind (siehe auch Abschnitt 4). Dennoch folgt daraus noch nicht, daß diesen angenommenen Entitäten etwas in der Welt entspricht. Aus der Akzeptanz einer Theorie aufgrund ihrer empirischen Adäquatheit folgt noch nicht die Annahme der Ontologie der Theorie. Im Gegenteil: Wir denken, daß prinzipiell unbeobachtbare Entitäten nicht ontologisch gedeutet werden sollten. Dazu formulieren wir folgendes Kriterium: *In der Ontologie einer Theorie sind nur diejenigen Entitäten zugelassen, die eine direkte oder indirekte (z. B. theorievermittelte) empirisch prüfbare Konsequenz haben.*

Dieses Kriterium ist sehr schwach. Es vermeidet es allein, daß völlige Beliebigkeit in den Theoriebildungsprozeß Einzug hält. Denn tatsächlich kann man zu jeder experimentell gut bestätigten Theorie, deren Formalismus wir als Struktur I bezeichnen (s. Abb. 3), *in vollkommen beliebiger Weise* zusätzliche Annahmen ohne empirische Konsequenzen hinzufügen, die aber die Ontologie der Theorie modifizieren. In Abb. 3 sind diese Annahmen als formale Struktur II bezeichnet. Die neue Theorie ist empirisch ebenso gut bestätigt wie die Konkurrenztheorie mit der formalen Struktur I allein; aufgrund der Beliebigkeit der zusätzlichen Annahmen erscheint es jedoch nicht rational, auf diesen Annahmen beruhende weitreichende Aussagen über die Beschaffenheit der Welt realistisch zu interpretieren.

4 Beispiele aus der Physikgeschichte

Um die Relevanz und Plausibilität des vorgeschlagenen Kriteriums zu verdeutlichen, sollen nun drei Beispiele aus der Physikgeschichte vorgestellt werden. Anschließend wird das Kriterium im Abschnitt 5 auf den Bohm-Kopenhagen-Fall angewendet.

1. *Die Existenz des Äthers:* Nachdem sich im 19. Jahrhundert die Wellentheorie des Lichts allmählich durchgesetzt hatte, wurde allgemein angenommen, daß elektromagnetische Wellen, wie alle anderen damals bekannten Wellen, ein Trägermedium benötigen. Dieses Medium nannte man den *Äther*. Angesichts der zahlreichen fehlgeschlagenen Versuche, Effekte der Bewegung durch den Äther nachzuweisen, konstruierte der niederländische Physiker Hendrik Antoon Lorentz eine Theorie, in der der Äther keine dynamischen Auswirkungen mehr hatte. Die theoretische Struktur „Äther“ hatte in dieser Theorie also keine empirischen Konsequenzen. Die

weitere Geschichte der Physik hat gezeigt, daß der Äther später in Einsteins Relativitätstheorie gänzlich eliminiert wurde. Einstein selbst gab dafür die folgende Begründung:

Beispiele ähnlicher Art sowie die mißlungenen Versuche, eine Bewegung der Erde relativ zum ‘Lichtmedium’ zu konstatieren, führen zur Vermutung, daß dem Begriff der absoluten Ruhe [...] keine Eigenschaften der Erscheinungen entsprechen [...] Die Einführung eines ‘Lichtäthers’ wird sich insofern als überflüssig erweisen ([8], S. 891).

2. *Die Realität der Atome:* Bis zum Ende des 19. Jahrhunderts gab es ernsthafte wissenschaftliche Kontroversen über die Frage nach der Existenz von Atomen. Zwar hatte sich der Atombegriff vor allem in der Chemie und in der kinetischen Gastheorie als äußerst hilfreich erwiesen. Deshalb wurde ihre instrumentelle Brauchbarkeit auch von Kritikern der Atomtheorie, wie z. B. Ernst Mach und Wilhelm Ostwald, nicht bezweifelt. Der ontologische Status von Atomen war aber der einer theoretischen Hilfsgröße, und nicht der von tatsächlich existierenden Dingen, weil die Experimente keine entsprechenden Hinweise ergaben. William Prout, der entdeckte, daß die Atomgewichte ganzzahlige Vielfache des Wasserstoff-Atomgewichts sind, formulierte diese Bedenken folgendermaßen:

The light in which I have always been accustomed to consider it [the atomic theory] has been very analogous to that in which I believe most botanists now consider the Linnean system; namely as a conventional artifice, exceedingly convenient for many purposes but which does not represent nature. (Zitiert nach [5], S. 47.)

Die Situation änderte sich erst, als Experimente direkte Hinweise auf die Existenz von Atomen gaben. Man denke etwa an die Entdeckung des Elektrons vor nunmehr hundert Jahren oder an die der Radioaktivität. Ebenfalls überzeugend wirkten Einsteins Erklärung der Brownschen Bewegung, die auf der Annahme der Existenz von Atomen beruhte und damit einen indirekten Hinweis auf deren Existenz gab. Gerade diese *indirekten Hinweise* sind in der modernen Physik besonders verbreitet.

3. *Gibt es Quarks?* Die Frage nach der Existenz von Quarks ist dafür ein gutes Beispiel, weil aus der zugrundeliegenden Theorie, der Quantenchromodynamik (QCD), selbst folgt, daß Quarks prinzipiell nicht einzeln beobachtbar sind („Quark-Confinement“). Es existieren jedoch sehr viele indirekte Belege für ihre Existenz. Diese zeigen sich z. B. in den im Labor meßbaren Strukturfunktionen und so ist es vernünftig, Quarks in die Ontologie der modernen Physik aufzunehmen.

Allen diesen Beispielen ist gemeinsam, daß eine ontologische Behauptung („Es gibt . . .“) in der Physikgeschichte nur dann positiv beantwortet wurde, wenn es gelang, die betreffende Objekte direkt oder indirekt dingfest zu machen. Die Physikgeschichte stützt also unser vorgeschlagenes Kriterium.

5 Eine Herausforderung für den Realismus?

Es ist nun leicht, unser Kriterium auf den Konflikt zwischen „Kopenhagen“ und „Bohm“ anzuwenden. Offenbar zerfällt die Bohmsche Theorie wie im Abbildung 3 in zwei relativ unabhängige theoretische Teile: (1) Den Teil des Formalismus, den sie mit der Kopenhagener Variante gemeinsam hat (also die Schrödingergleichung usw.). Dies entspricht der formalen Struktur I in Abb. 3 (2) Zusätzliche Aussagen über Teilchenörter und -bahnen. Diese entsprechen der abgebildeten formalen Struktur II. Folgt man Cushing mit der Annahme, daß „Kopenhagen“ und „Bohm“ empirisch äquivalent sind, so wird klar, daß Orte und Bahnen in dieser Theorie keine direkten oder indirekten empirischen Auswirkungen haben. Alle Bestätigungen der Bohmschen Theorie beziehen sich ausschließlich auf die Struktur I, also denjenigen Teil des Formalismus, den „Bohm“ mit „Kopenhagen“ teilt. Da die Struktur II keine eigenen empirischen Konsequenzen hat, ist sie folglich nicht bestätigt. Unserem Kriterium zufolge können diese Teile der Theorie daher nicht ontologisch interpretiert werden. Daher ist es nicht rational, quantenmechanischen Teilchen Orte und Bahnen zuzusprechen.

Ein ähnliches Argument wurde bereits von Werner Heisenberg gebracht, als er davor warnte, die Bohmschen Bahnen als eine adäquate Beschreibung der Realität zu deuten:

[Die Bohmsche] Beschreibung enthüllt sich ... als eine Art von ideologischem Überbau, der mit der unmittelbaren physikalischen Realität nur noch wenig zu tun hat. Denn die verborgenen Parameter der Bohmschen Theorie sind ja von einer solchen Art, daß sie, sofern die Quantentheorie nicht abgeändert wird, in der Beschreibung der wirklichen Vorgänge nie vorkommen können. ([12], S. 106)

Der Beliebigkeitsvorwurf an die Adresse der Bohmschen Version der Quantenmechanik wird in einer kürzlich erschienenen Arbeit von E. Deotto und G.-C. Ghirardi [7] noch weiter erhärtet. Die beiden Autoren zeigen explizit und konstruktiv, daß es unendlich viele Theorien der Bohmschen Art gibt, die alle mit den empirischen Konsequenzen der Kopenhagener Version der Quantenmechanik übereinstimmen. Diese Theorien unterscheiden sich von der Bohmschen Theorie nur dadurch, daß sie unterschiedliche Vorhersagen für die Teilchenbahnen liefern und damit, im Sinne unsere Abbildung 3, mit einer modifizierten Struktur II arbeiten. Wenn man also an der Vorstellung der Teilchenbahnen festhält, dann muß die Wahl zwischen diesen Theorien nach nicht-empirischen Kriterien erfolgen.

In Bezug auf die Realismusdebatte bedeuten diese Ergebnisse, daß eine rationale Wahl zwischen „Bohm“ und Kopenhagen möglich ist. Tatsächlich befindet sich Cushing in einer Zwickmühle: Entweder trifft die Annahme der empirischen Äquivalenz der beiden Theorien nicht zu. Dann kann die Entscheidung auf „konventionellem“ Wege (d. h. durch das Experiment) erfolgen. Oder aber die beiden Theorien sind tatsächlich empirisch äquivalent. Dann aber sollte die Bohmsche Theorie nicht realistisch interpretiert werden, da sie Annahmen enthält, die keine empirischen Konsequenzen haben.

Literatur

- [1] *K. Baumann und R. Sexl*: Die Deutungen der Quantentheorie, Braunschweig, Vieweg, 1987
- [2] *N. Bohr*: Kann man die quantenmechanische Beschreibung der Wirklichkeit als vollständig betrachten? In: [1], S. 87-97
- [3] *N. Bohr*: Erkenntnistheoretische Fragen in der Physik und die menschlichen Kulturen, Ansprache beim internationalen Kongreß für Anthropologie und Ethnologie 1938. Nature 143, 268, 1939; abgedruckt in: Atomphysik und menschliche Erkenntnis – Aufsätze und Vorträge aus den Jahren 1930 bis 1961, Vieweg, Braunschweig, 1985
- [4] *D. Bohm*: Vorschlag einer Deutung der Quantentheorie durch „verborgene“ Variable. In: [1], S. 163-192
- [5] *L. Brown, A. Pais und B. Pippard (eds.)*: Twentieth Century Physics, IOP Publishing, Bristol, 1995
- [6] *J. Cushing*: Quantum Mechanics: Historical Contingency and the Copenhagen Hegemony, University of Chicago Press, Chicago, 1994
- [7] *E. Deotto und G. Ghirardi*: Bohmian Mechanics Revisited. Preprint <http://xxx.lanl.gov/abs/quant-ph/9704021>
- [8] *A. Einstein*: Zur Elektrodynamik bewegter Körper. Annalen der Physik, 17, 891, 1905
- [9] *A. Einstein, B. Podolsky und N. Rosen*: Kann man die quantenmechanische Beschreibung der Wirklichkeit als vollständig betrachten? In: [1], S. 80-86
- [10] *B.-G. Englert, M. O. Scully, G. Süßmann und H. Walther*: Surrealistic Bohm Trajectories. Zeitschrift für Naturforschung, 47a, 1175, 1992
- [11] *P. Feyerabend*: Wider den Methodenzwang, Frankfurt, Suhrkamp, 1995
- [12] *W. Heisenberg*: Physik und Philosophie, Ullstein, Frankfurt, 1986
- [13] *D. Hiley und D. Peat*: Quantum Implications. Essays in Honor of David Bohm. Routledge and Kegan Paul, London, 1987
- [14] *W. Kuhn*: Physik II, Westermann-Verlag, Braunschweig, 1999 (Neuaufgabe)
- [15] *R. Müller, B. Schmincke und H. Wiesner*: Atomphysik und Philosophie – Niels Bohrs Interpretation der Quantenmechanik. Physik in der Schule, 34, 165, 1996
- [16] *W.V.O. Quine*: From Stimulus to Science, Cambridge (Mass.), Harvard University Press, 1995
- [17] *H. Stapp*: The Copenhagen Interpretation. American Journal of Physics, 40, 1098, 1972

- [18] *M. Stöckler*: Philosophen in der Mikrowelt – ratlos? Zum gegenwärtigen Stand des Grundlagenstreits in der Quantenmechanik. *Zeitschrift für allgemeine Wissenschaftstheorie*, 17, 68, 1986
- [19] *J.-P. Vigié, C. Dewdney, P. Holland und A. Kyprianidis*: Causal particle trajectories and the interpretation of quantum mechanics. In: [13], S. 169-204