

II DIE SUCHE NACH ALTERNATIVEN ZUR KOPENHAGENER INTERPRETATION

Die Physik stand nach der Entdeckung der Quantentheorie vor dem Dilemma, zwar über eine empirisch außerordentlich erfolgreiche Theorie zu verfügen, welche jedoch zugleich mit einer Reihe bizarrer Implikationen einhergeht. Da der große Erfolg in der Anwendung der Quantentheorie¹ aber nicht das Problem ihrer Interpretation löst, wundert es nicht, dass ambitionierte Physiker versuchen, das Manko der problematischen Deutung der Quantentheorie zu reparieren. Wir treffen nun auf eine Reihe von Suchbewegungen, die einen Rückweg zu den Ordnungsverhältnissen der klassischen Physik versprechen. Als Bezugsproblem, an dem man sich jetzt abarbeitet, erscheint hier zum einen der Status des Beobachtungsprozesses in der Kopenhagener Deutung – der Beobachter stört und verleitet zudem dazu, ein subjektives Moment in die Physik einzuführen. Zum anderen bleibt der Status der Wellenfunktion ψ offen. Die Schrödinger-Gleichung erscheint jetzt einerseits als Universalformel der Quantentheorie, doch der für die Kopenhagener Deutung so wichtige unstetige Kollaps der Wellenfunktion kommt hier nicht vor. Neben dem weltanschaulichen Problem des Beobachtereffekts zeigt sich in der Quantenphysik hier sozusagen ein theorieästhetisches Defizit. Man muss etwas von außen in die Theorie einführen, was in ihr nicht vorkommt.

Die folgenden Ausführungen beschäftigen sich mit der Suche nach alternativen Deutungen im Anschluss an die Kopenhagener Interpretation, die auf diese Bezugsprobleme antworten. Wir beginnen mit der *Ensemble-Interpretation* als dem Versuch, zu einer klassischen Auffassung der Realität zurückzukehren. Aus dieser Perspektive erscheinen die seltsamen Eigenschaften der Quantentheorie, insbesondere die nicht-lokale Verknüpfung von Observablen und die Bedeutung des Beobachtungsaktes, nur als ein Artefakt einer komplexen statistischen Beschreibung. Das mit der Quantentheorie

¹ In den wenigen Jahren nach ihrer Entstehung führte die Quantentheorie rasch zu einer Vielzahl von Entdeckungen. Die Orbital-Modelle des Atoms bilden die Grundlage der organischen Chemie. Mit der Quantentheorie wurde eine Theorie des radioaktiven Zerfalls möglich. Quantentheoretisch modellierte Prozesse erklären die Arbeitsweise von Transistoren ebenso wie die erstaunlichen Phänomene der Supraleitung und Suprafluidität.

aufgeworfene Geheimnis des Beobachters und der mit ihm in die Welt gesetzten willkürlichen Schnitte würde sich hiermit als eine Illusion erweisen. Insbesondere der Philosoph und Wissenschaftstheoretiker Karl Popper hat diesbezügliche Argumentations- und Diskussionsstrände vertreten und zusammengeführt. Für die folgende Darstellung greifen wir insbesondere auf seinen Beitrag *Quantum Mechanics without 'the Observer'* aus dem Jahre 1967 zurück,² da sich die Grundzüge der Argumentation hier gut nachvollziehen lassen – und entsprechend deutlich wird, woran sie letztlich scheitert.

Demgegenüber stellt die Bohmsche Mechanik eine wirkliche Alternative zur Kopenhagener Interpretation dar. Auch der Physiker David Bohm hat nach einem Weg gesucht, die deterministische Teilchenauffassung aufrechtzuerhalten, um auf diesem Wege Momente einer klassischen Beschreibung beizubehalten zu können. Dies hat ihn 1952 zu einer Theorie geführt, welche zwar weiterhin von ‚realen‘ Teilchen ausgeht, die auch dann existieren, wenn sie nicht beobachtet werden. Diese sind jedoch über die Wellenfunktionen in eine komplexe holistische Weltbeziehung einzubetten, welche die Teilcheneigenschaften konditionieren.³ Die Bohmsche Mechanik beruht auf einer etwas abgewandelten Schrödinger-Gleichung, ist dieser jedoch in Hinblick auf ihre experimentelle Erklärungskraft äquivalent.

Die dritte prominente Alternative zur Kopenhagener Deutung bildet die 1957 durch Hugh Everett formulierte Viele-Welten-Theorie.⁴ Everetts Überlegungen setzen an dem Problem an, dass die Physik eine mathematisch elegante und in Hinblick auf empirische Fragestellungen extrem leistungsfähige Schrödinger-Gleichung vorfindet, man gleichzeitig jedoch einen Wellenkollaps postulieren muss, der sozusagen physikfern von außen in den Formalismus ‚hinein beobachtet‘ werden muss. Auch Everett strebt eine Lösung an, die ohne den Beobachter auskommt. Er begreift dabei die Wellenfunktion ψ als grundlegendes physikalisches Erklärungsprinzip, mit dem der Weltverlauf deterministisch beschrieben werden kann. Seine Antwort besteht darin, eine Wellengleichung der Welt zu postulieren, die zwar weiterhin einen multiplen verzweigten Baum von Entscheidungsalternativen generiert, diese nun jedoch alle gleichzeitig als *realisiert* betrachtet werden.

Man braucht dann keinen Kollaps der Wellenfunktion mehr, der in die Wahl einer Alternative mündet. Vielmehr besteht jetzt eine Vielzahl paralleler Welten und an jeder neuen Weichenstellung quantenmechanischer Bestimmung können weitere Welten entstehen.

² Popper (1967).

³ Bohm (1952a; 1952b).

⁴ Everett (1957).

Die vermeintlichen Lösungen zeigen sich jedoch allesamt nicht weniger absonderlich als die Probleme, welche hierdurch vermieden werden sollen. Sie führen keineswegs zurück in die angestrebten klassischen Gefilde der vertrauten Physik. Die Zusammenschau der Alternativen lässt damit erneut die Bezugsprobleme deutlich werden, die sich ergeben, wenn man sich auf die Quantentheorie einlässt.

I Ensemble-Interpretation: Rückkehr zum Teilchenbild

Die Ensemble-Interpretation zielt darauf, zum Theorieverständnis der klassischen Physik zurückzufinden. Der Weg, mit dem dies erreicht werden soll, schließt an die von Born vorgelegte statistische Interpretation der Wellenfunktion an,⁵ mit der versucht wird, die im Experiment auftretenden Messunschärfen auf statistische Streuungen von Teilchenensembles zurückzuführen. Die Unbestimmtheiten bei der Messung an Quantenobjekten ergeben sich aus dieser Perspektive allein deshalb, weil man es mit Gruppen sich inhomogen bewegender Teilchen zu tun hat. Weil man die Anfangszustände der Orte und Impulse der Teilchenensembles nicht wissen könne, würden sich in Hinblick auf potenzielle Messungen nur statistische Beschreibungen anfertigen lassen. Die Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation würde damit also nicht auf der *realen* Unschärfe des Produkts zweier nicht vertauschbarer Operatoren beruhen, sondern wäre als ein Artefakt einer falsch verstandenen statistischen Theorie zu erklären. Wenn man mit statistischen Verfahren keine genauen Aussagen treffen kann, so dürfe man im Umkehrschluss nicht daraus folgern, dass die Unbestimmtheit eine Eigenschaft realer Objekte darstelle. Um es mit den Worten Poppers zu formulieren:

»Bedenkt man, daß die Plancksche Theorie eine statistische Theorie ist, so lassen sich die Heisenbergschen Formeln ganz natürlich als statistische Streurelationen auffassen, wie ich vor mehr als 30 Jahren anregte. Das heißt sie sagen nichts aus über die mögliche Genauigkeit von Messungen oder über irgendwelche Grenzen des Wissens. Sind es aber Streurelationen, so sagen sie etwas aus über die Grenzen der Homogenität quantenphysikalischer Zustände und damit, obwohl indirekt, etwas über die Voraussagbarkeit.

⁵ Max Born selbst bliebt auch noch während seines Nobelpreisvortrags im Jahr 1954 der von ihm entwickelten statistischen Interpretation treu (Born 1954).

Beispielsweise sagt die Formel $\Delta p_i \Delta q_i \approx h$ [...] einfach aus: Wenn wir die x-Koordinate eines Systems (etwa) eines Elektrons bestimmen, dann streut bei Wiederholungen des Experiments der Impuls. [...] Es gibt nicht den geringsten Grund, den realistischen und objektivistischen Charakter der gesamten Physik zu bezweifeln. [...] Der Beobachter ist wesentlich der Mensch, der die Theorie prüft. Dazu braucht er viele andere Theorien, konkurrierende Theorien und Hilfsthеorien. Das alles zeigt, daß wir weniger Beobachter als Denker sind.«⁶

Poppers Argumentation ist stark durch die Arbeiten des Physikers Alfred Landé beeinflusst. Landé stand in engem Kontakt zu Max Born, David Hilbert und Niels Bohr. Landé unterstützte zunächst die Kopenhagener Interpretation, suchte dann aber später nach einer alternativen Erklärung. Auf Basis von Duanes Vorschlag,⁷ die Verteilungen im Spaltexperiment einfach als mechanische Wechselwirkung zwischen den Spaltwänden und bewegten Teilchen zu erklären, entwickelte er eine ausgefeilte statistische Theorie, entsprechend der die Welleneigenschaft der Materie als ein Messartefakt erscheint.⁸

Das Beobachterparadoxon der Quantenmechanik würde damit schlichtweg auf dem Missverständnis beruhen, dass die Theorie in Hinblick auf statistische Problemlagen hin konzipiert wurde und man entsprechend von ihr nur statistische Antworten erwarten könne. Alle weitergehenden ontologischen und epistemischen Aussagen zu Quantensystemen würden damit schlichtweg auf einem Kategorienfehler beruhen.⁹ Gleicherweise würde dann selbstredend auch für den Welle-Teilchen-Dualismus gelten müssen, denn alle am Ensemble beteiligten Objekte wären nun prinzipiell als klassische Teilchen erklärbar. Im Sinne eines prinzipiell statistisch angelegten Theorieinstruments wäre es allerdings durchaus korrekt, in Hinblick auf die

⁶ Popper (1993, 316 f.).

⁷ Duane (1923).

⁸ Siehe Landé (1965).

⁹ Hierzu Popper im Originaltext: »Unfortunately many people, including physicists, talk as if the distribution function (or its mathematical form) were a property of the elements of the population under consideration. They do not discriminate between utterly different categories or types of things, and rely on the very unsafe assumption, that 'my' probability of living in the South of England is, like 'my' age, one of 'my' properties – perhaps one of my physical properties«. Sowie weiter zur Heisenbergschen Unbestimmtheitsrelation: »My thesis is that these formulae set some lower limits to the *statistical dispersion* or *'scatter'* of the results of sequences of experiments: they are *statistical scatter relations*. They thereby limit the precision of certain individual *predictions*« (Popper 1967, 19 f.).

Wellenfunktion von ›Wahrscheinlichkeitsfeldern‹ zu sprechen. Beide Beschreibungsebenen – die Teilchen- und die stochastische Ebene – dürfen dann allerdings nicht miteinander verwechselt oder in eine kausale Beziehung zueinander gebracht werden.¹⁰

Aus der hiermit formulierten Perspektive ließe sich die Quantentheorie auf eine physikalisch objektive und realistische Perspektive zurückführen. Als statistische Theorie erlaube sie, ›Wahrscheinlichkeitshypothesen‹ aufzustellen, die dann statistisch geprüft werden können. Das Nichtwissen des Experimentators wäre dann jedoch keineswegs subjektivistisch zu interpretieren bzw. dem Messvorgang zuzurechnen, sondern würde sich einfach als eine objektive Eigenschaft der Versuchsanordnung ergeben, die von ihrer Anlage her gesehen es einfach nur mit streuenden Ensembles zu tun bekommt.¹¹

¹⁰ »My eleventh thesis is this: even though both the particles and the probability fields are real, it is misleading (as Landé rightly insists) to speak of a ›duality‹ between them: the particles are important *objects* of the experimentation; the probability fields are propensity [Neigungsfelder] fields, and as such important properties of the experimental arrangement, and of its specified conditions.«

»My twelfth thesis is that the mistaken idea of duality of particle and wave is, partly, due to the hopes raised by de Broglie and Schrödinger of giving a wave theory of the *structure of particles*« (Popper 1967, 39 f.).

¹¹ »Denn die objektive Wahrscheinlichkeit sagt uns nur, was durchschnittlich geschieht, wenn ein solches Ereignis sich viele Male wiederholt: Über das Einzelereignis sagt die objektive statistische Wahrscheinlichkeit nichts.

Das war der Punkt, an dem der Subjektivismus Eingang in die Quantenmechanik fand, sowohl nach Einsteins Ansicht als auch nach der seiner Gegner. Und an diesem Punkt versuchte ich, den Subjektivismus zu bekämpfen, indem ich die Propensitätsinterpretation der Wahrscheinlichkeit einführte. Das geschah nicht *ad hoc*. Es war vielmehr das Ergebnis einer kritischen Überprüfung der Argumente, die der Häufigkeitsinterpretation der Wahrscheinlichkeit zugrunde liegen.

Der Hauptgedanke war, daß Propensitäten (Verwirklichungstendenzen) als physikalische Realitäten aufgefasst werden können. Sie sind Maße oder Maßzahlen von Dispositionen. Messbare physikalische Dispositionen (›Potentiale‹) waren in der Physik durch die Feldtheorie eingeführt worden. Es gab also einen Präzedenzfall, in dem Dispositionen als physikalisch real aufzufassen, nicht ganz fremdartig ist. Und er ließ Raum für Indeterminismus« (Popper 1994, 224). »Es ist deshalb jetzt möglich, eine ganze Sippe von philosophischen Gespenstern zu bannen und mit allen jenen verblüffenden philosophischen Behauptungen aufzuräumen, die von einer Einmischung des beobachtenden Subjekts, des Bewusstseins oder des Geistes in die Welt der Atome sprechen. Diese angebliche Einmischung läßt sich weitgehend wegerklären: Sie entsteht, wenn die traditio-

Die Wahrscheinlichkeiten der ψ -Funktion werden jetzt als *objektive* Eigenschaften der untersuchten physikalischen Systeme interpretiert. Diese Eigenschaften könnten dann nicht vom Wissen eines Beobachters abhängen, sondern wären den untersuchten Phänomenen selbst gegeben. Popper betrachtet also auch die Verwirklichungstendenz (die Propensität) eines Ergebnisses (z. B. den Durchtritt durch die eine oder andere Spaltöffnung) als eine objektive, beobachteter-unabhängige Eigenschaft. Propensitäten ergeben allerdings nur unter einem relationalen Blickwinkel Sinn, nämlich im Verhältnis zu den anderen potenziell realisierbaren Versuchsausgängen.¹² Mit der Ensemble-Interpretation würde sich also für das System der Teilchengruppe als Ganzes die Wahrscheinlichkeitsverteilung als *objektive* physikalische Eigenschaft ergeben, woraus dann auch die Ereigniswahrscheinlichkeiten konkreter Messereignisse als objektive Parameter abgeleitet werden können.¹³ So plausibel und anschaulich die Ensemble-Interpretation auf den ersten Blick erscheint, ein gewichtiges Theorieproblem bleibt jedoch bestehen: die Erklärung der *verbundenen* Wahrscheinlichkeitsbeziehungen während der *Interferenz* unterschiedlicher Wellenzüge. Dies erkennt auch Popper an, wenngleich er hofft, mit Landé zumindest einen qualitativen Ausweg gefunden zu haben:

»Eine Erscheinung, die in der Tat für die Quantentheorie spezifisch ist, ist die (phasenabhängige) Interferenz von Wahrscheinlichkeiten. (Genauer: von Wahrscheinlichkeitsamplituden. Es ist denkbar, daß wir dies als Letztes zu akzeptieren haben. Es scheint jedoch, daß das nicht der Fall ist. [...] Duanes Regel für die Quantisierung des Impulses kann nicht nur auf Photonen, sondern (wie Landé hervorhebt) auch auf andere Partikel angewendet werden, und sie liefert dann eine rationale (wenn auch nur qualitative) Erklärung der Teilcheninterferenz. Landé scheint weiter einen Weg gezeigt zu haben, auf dem die quantitativen Interferenzregeln der Wellenmechanik aus recht einfachen (wenn auch zusätzlichen Annahmen) abgeleitet werden können.«¹⁴

nelle subjektivistische Fehlinterpretation des Wahrscheinlichkeitskalküls auf die Atomtheorie übertragen wird« (Popper 1994, 132 f.).

¹² Siehe ausführlich zum Konzept der objektiven Wahrscheinlichkeit Popper (1995).

¹³ Im Prinzip könnte man jetzt den objektiven Zufall auch in die mikroskopische Ebene selbst legen. Ein einzelnes Quantenteilchen wäre dann sozusagen »objektiv« unbestimmt und würde sich unabhängig vom Beobachter mit einer bestimmten Tendenz in dieser oder jener Form verwirklichen. Siehe zur Diskussion dieser Position Mohrhoff (2000) und Shafiee et. al. (2006).

¹⁴ Popper (1994, 132 f.)

Das Grundproblem ist hiermit aber keineswegs gelöst, denn Interferenz bedeutet auch die *Auslöschung* von Wahrscheinlichkeiten und dies würde bedeuten, dass in die ψ -Funktion auch *negative* Werte in die Rechnung eingehen müssten. In der klassischen Wahrscheinlichkeitsrechnung gibt es aber *keine* negativen Wahrscheinlichkeiten. Leslie Ballentine folgend, einem aktuellen Vertreter der Ensemble-Interpretation, hätten wir also entweder eine komplexe Wahrscheinlichkeitsverteilung anzunehmen – die dann allerdings wohl nicht mehr auf Basis klassischer physikalischer Konzepte verstanden werden kann – oder man wäre gezwungen, nur noch einen Teil der ψ -Funktion als physikalisch real anzusehen.¹⁵ Dem letzten Vorschlag folgend würde sich aber nun die Frage stellen, was mit dem anderen Teil geschehen soll. In den Rechnungen der Experimentalphysiker wird der imaginäre Teil offensichtlich gebraucht – ohne ihn funktionieren die Formeln nicht. Es bleibt also nichts anderes übrig, als sich einzustehen, dass die Verhältnisse komplizierter sind und man die Ensemble-Interpretation der Quantentheorie nicht auf Basis der aus der klassischen Physik vertrauten Konzepte formulieren kann.

Die Kopenhagener Interpretation betrachtet die Nicht-Vertauschbarkeit der Operatoren als ontologisches Primat, um auf diese Weise zu einer ebenso einfachen wie erklärmungsstarken Theorie zu kommen. Hierfür ist allerdings ein Preis zu zahlen: die Paradoxien des Messproblems und die Aufgabe des klassischen Verständnisses der Realität. Die Ensemble-Interpretation hingegen behält die klassische Realitätsauffassung bei, wird auf diesem Wege jedoch gezwungen, eine Statistik verbundener Wahrscheinlichkeiten zu entwickeln, die komplexe Beziehungen postulieren müssen, welche ebenfalls einer klassischen Beschreibung spotten.

Nolens volens hat auch sie anzuerkennen, dass die Phänomene der Quantenwelt in einer nicht-trivialen, möglicherweise nur holistisch beschreibbaren Weise miteinander zusammenhängen. Die Ensemble-Interpretation – insofern sie hinreichend komplex argumentiert – eröffnet erneut die Diskussion um mögliche verborgene Variablen, die mit der Kopenhagener Deutung überwunden schien.¹⁶ Während

¹⁵ »Since a ›well defined‹ but negative probability makes no sense, some modifications of either (5.18 [Verweis auf vorige Formel, die eine komplexe Wahrscheinlichkeitsverteilung darstellt]) or the interpretation seems in order (such as, perhaps, a restriction on the states which are to be considered physically realizable). This objection does not necessarily invalidate the concept of a complex probability distribution, but the usefulness of such a distribution is yet to be determined« (Ballentine 1970, 374).

¹⁶ »The Statistical Interpretation, which regards quantum states as being descriptive of ensembles of similarly prepared systems, is completely

Heisenberg und v. Neumann einfach postulieren konnten, dass es keine zusätzlichen Freiheitsgrade gibt und deshalb der Zufall in die Welt eintritt, stellt sich mit der statistischen Interpretation erneut die Frage, welche physikalischen Beziehungen Muster erklären können, in welchen sich Wahrscheinlichkeitstendenzen offensichtlich nicht nur addieren, sondern auch subtrahieren können.

Der epistemische Schnitt, welcher mit der Ensemble-Interpretation in die Welt gelegt wird, führt zwar zu einer einfachen Ontologie, da er auf einer klassischen und beobachterunabhängigen Teilchenwelt beruht. Hierfür ist jedoch der Preis zu zahlen, komplexe und verborgene Beziehungen anerkennen zu müssen, welche genau das, was mit dieser Theorie geleistet werden soll, unterminieren. Die offene Wunde der Ensemble-Interpretation liegt also darin, dass sie im entscheidenden Punkt nichts mehr zu erklären vermag. Auch sie führt nicht zu einer Klärung der Verhältnisse auf subatomarer Ebene, sondern wirft eine neue, eigentümliche Paradoxie auf: Je besser die statistische Modellierung aufgrund klassischer physikalischer Modelle gelingt, desto mehr werden Beziehungen gewahr, die sich nicht mehr mit einer Statistik klassischer Wirkbeziehungen modellieren lassen.

Die Ensemble-Interpretation steht für eine Suchbewegung, die alle Grundannahmen der klassischen Physik beizubehalten versucht. Die konsequente Verfolgung dieses Weges führt offensichtlich in Paradoxien, welche den mit diesem Versuch verbundenen Anspruch unterminieren.

2 Bohmsche Mechanik: Holistische Ordnungen

Die Ausgangslage der Bohmschen Theorie besteht in der Auffassung, dass Teilchen *per se* als real zu betrachten sind und es entsprechend keinen Sinn ergibt, von einem Wellenkollaps auszugehen, mit dem die Teilchen erst entstehen würden. Anders als in der Ensemble-Interpretation wird die Teilchenauffassung jedoch nun in eine nicht klassische Weltbeziehung eingebettet. Die Wellenfunktion und die mit ihr auftretenden Interferenzbeziehungen erscheinen bei Bohm nicht mehr einfach nur als statistisches Artefakt. Den mit ihr aufge-

open with respect to hidden variables. It does not demand them, but it makes the search for them entirely reasonable [this was the attitude of Einstein (1949)]. On the other hand, the Copenhagen Interpretation, which regards a state vector as an exhaustive description of an individual system, is antipathetic to the idea of hidden variables, since a more complete description than that provided by a state vector contradict that interpretation» (Ballentine 1970, 374).

spannten Potenzialen wird vielmehr ebenso wie den Teilchen ein Relativitätsstatus zugestanden. Bohm schlägt vor, von einer Führungswelle auszugehen, durch die ein Teilchen gleichsam gelenkt und gesteuert wird. Im Prinzip wurde diese Idee bereits von de Broglie im Jahr 1927 formuliert. Doch aufgrund konzeptioneller Schwächen traf dieser Ansatz damals auf wenig Resonanz. Bohm hingegen gelang eine konsistente mathematische Ausformulierung dieser Idee, mit der in Hinblick auf empirische Erklärungskraft das Gleiche geleistet werden kann wie mit der orthodoxen Quantenmechanik.

Der Weg hierzu besteht darin, die Schrödinger-Gleichung durch eine zweite Gleichung zu ergänzen, welche die Bewegungen der geilenkten Teilchen beschreibt. Diese laufen gleichsam auf dem mit der ψ -Funktion aufgespannten Wellenzug. Da die Teilchenbewegung jetzt als durch die Phase der Welle geleitet betrachtet wird, erhält sie zu jedem Zeitpunkt einen genau bestimmten Ort. Die bei einer Messung auftretende Unschärfe würde sich entsprechend dadurch ergeben, dass man nicht wisse, wo sich das Teilchen ursprünglich befunden habe.¹⁷

Auf den ersten Blick scheint es so, als ob es sich bei der Bohmschen Mechanik um eine klassische Theorie mit verborgenen Variablen handele. Dass eine solche Konzeption nicht mit den Regeln der Verrechnung der Operatoren, auf denen die Schrödinger-Gleichung basiert, in Einklang zu bringen ist, hat bereits v. Neumann gezeigt.¹⁸ Aufgrund der Nicht-Vertauschbarkeit der Operatoren stehen einem Quantensystem keine zusätzlichen Freiheitsgrade zur Verfügung. Die Idee der Führungswelle schien damit zunächst erledigt.

Bei genauerem Hinsehen zeigt sich jedoch, dass die Bohmsche Mechanik keine klassische Theorie darstellt. Versuchen wir im Folgen-

¹⁷ Die »Bohmsche Mechanik ergänzt die Schrödingergleichung um Bewegungsgleichungen für die Ortskoordinaten des jeweiligen ›Quantensystems‹, also etwa für das Hüllelektron des Wasserstoffatoms. In der Bohmschen Mechanik sind Wellen- und Teilcheneigenschaften also nicht komplementär zueinander, und ein Teilchen hat zu jedem Zeitpunkt einen definierten Ort. [...] Das -Feld ›führt‹ also die Teilchenbewegung und bekommt eine reale physikalische Bedeutung. Die statistischen Vorhersagen der üblichen Quantenmechanik können alle reproduziert werden, wenn man für die Anfangsbedingungen der Orte von Teilchen, die durch die Wellenfunktion beschrieben werden, eine χ -Verteilung wählt. Dies nennt man die Quantengleichgewichtshypothese. Die Bohmsche Mechanik ist eine deterministische Theorie, und ihre Wahrscheinlichkeitsaussagen haben den gleichen Status wie in der klassischen statistischen Physik: Sie sind lediglich der Unkenntnis über die genauen Anfangsbedingungen geschuldet.« (Passon 2010, 1).

¹⁸ v. Neumann (1932).

den die Konsequenzen, welche sich aus dieser Theorieanlage ergeben, mit den Worten von Passon etwas genauer nachzuvollziehen. Wie bereits gesagt, haben wir von der »Schrödinger-Gleichung sowie einer zweiten Führungsgleichung für den Teilchenort auszugehen. Die Teilchenbewegung wird also durch die Phase S der Wellenfunktion geleitet.«¹⁹ Hiermit ist das System schon vollkommen determiniert. Da die Schrödinger-Gleichung an sich schon eine deterministische Zeitentwicklung beschreibt, ist mit der zusätzlichen Ortsbestimmung bereits alles festgelegt. Da jetzt aber aufgrund des Quantenformalismus keine weiteren Freiheitsgrade mehr vorhanden sind, »verlieren Konzepte wie Energie, Impuls etc. auf dem Niveau der individuellen Bohmschen Teilchen ihre Bedeutung.«²⁰

All die bekannten klassischen Variablen wie auch die neuen Quanteneigenschaften (z. B. der Spin) existieren damit nicht mehr als individuierbare Eigenschaften von Teilchen, sondern bestehen nur noch als *kontextualisierte* Merkmale ebendieser Teilchen, welche in die Dynamik der Schrödinger-Gleichung eingebettet sind. Die Bohmsche Mechanik leistet damit eine »komplette Umdeutung des Observablenkonzeptes der Quantenmechanik«. Hierdurch rückt der nicht-klassische Charakter der Quantentheorie wesentlich stärker in den Vordergrund als in der Kopenhagener Interpretation. »Der Ausgang eines Experiments zur Messung von Spin, Energie, Impuls etc. wird ebenso wie alle anderen Wechselwirkungen in der Bohmschen Mechanik durch Anfangsort und Wellenfunktion festgelegt. Die Größen (bzw. ihr späterer ›Messwert‹) sind nicht direkt dem Teilchen auf der Bohmschen Trajektorie zugeordnet, sondern gewinnen ihren Wert (und damit auch ihre Bedeutung) erst aus dem Zusammenspiel von Wellenfunktion, Teilchenort und Messapparatur«.²¹

Auf einer oberflächlichen Ebene ergeben sich im Falle einer Messung die gleichen Resultate wie in der orthodoxen Quantenmechanik. Auch hier gilt dann das Bornsche Messpostulat.²² Auf einer tieferen Ebene ist jedoch von einer *umfassenden Kontextualität* auszugehen. Hier ist dann »der Ort die einzige ›Eigenschaft‹ des Teilchens und was man lax ›Impuls des Teilchens‹ bzw. ›Energie‹, ›Drehimpuls‹ etc. nennt, ist lediglich das Ergebnis eines entsprechenden Messexperiments. Ein solches Experiment macht mehr, als lediglich eine

¹⁹ Passon (2010, 31).

²⁰ Ebd., 34.

²¹ Ebd., 40.

²² »Die individuellen Teilchenbahnen der Bohmschen Mechanik entziehen sich aufgrund der Quantengleichgewichtsbedingung der Beobachtbarkeit, führen aber im statistischen Mittel auf die Vorhersagen der Quantenmechanik« (Passon 2010, 40).

Teilcheneigenschaft zu erkunden, sondern erzeugt im Wortsinn das Resultat durch Verschränkung von Objektwellenfunktion mit der Wellenfunktion des Messgeräts«.²³

Da Quantensysteme jedoch aus miteinander verschränkten Wellenfunktionen bestehen, werden »auch die Teilchenorte in nichtlokaler Weise« gekoppelt und damit »hängt die Bewegung eines Teilchens explizit vom Teilchenort« eines »jeweils anderen ab«.²⁴ Die ›spukhafte Fernwirkung‹, welche Einstein, Podolsky und Rosen in ihrem Gedankenexperiment noch als unannehbare Theoriekonsequenz brandmarken konnten, wird hier zur Regel erklärt.²⁵

Aus der Bohmschen Mechanik folgt ein *Quantenholismus*, in dem einerseits entsprechend den mit der Wellenfunktion gegebenen Potenzialen gleichsam alles mit allem zusammenhängt. Andererseits begegnen wir hier Teilchen, die entgegen der Kopenhagener Deutung auch in ihrer Nichtbeobachtung als ›reale‹ Objekte betrachtet werden können. Wir brauchen keinen Kollaps der Wellenfunktion mehr, da alles bereits durch die Schrödinger-Gleichung und den uns prinzipiell unbekannten Anfangsorten der Teilchen gegeben ist. Mit Bohm könnten wir somit zu einer deterministischen Weltauffassung zurückkehren, haben hierfür allerdings eine Welt zu akzeptieren, in der alles mit allem in *nicht-lokalen* Beziehungen zusammenhängt.

Im Allgemeinen erlaubt die Bohm'sche Mechanik, für quantenmechanische Experimente die gleichen Vorhersagen zu treffen wie bereits mit dem Formalismus der orthodoxen Quantenmechanik. Aus diesem Grunde könnte man entsprechend dem Sparsamkeitsprinzip argumentieren, dass man doch bei der einfacheren Formulierung bleiben sollte. Darüber hinaus bestehen verschiedene Varianten, wie man die Bohm'sche Theorie zu einer allgemeinen Quantentheorie weiterentwickeln kann. Im Fachdiskurs bestehen mehrere Alternativen, die in unterschiedlicher Strenge und Konsequenz dem Primat der »*beables*«²⁶ folgen, also davon ausgehen, »dass jeder Zustand zu jedem Zeitpunkt einen definierten Wert dieser Größe besitzt und nicht nur nach einer Messung«.²⁷

Neue Aktualität gewann die Bohmsche Mechanik durch die Bell'sche Ungleichung, mit der das Postulat der nicht-lokalen Wechselwir-

²³ Passon (2010, 55).

²⁴ Ebd., 79.

²⁵ Einstein, Podolsky und Rosen (1935).

²⁶ Der Begriff ›beable‹ wurde durch Bell geprägt und bezeichnet eine epistemische Haltung, in der auch unter Quantenbedingungen weiterhin von einer Existenz ›seiender‹ Objekte ausgegangen wird (vgl. Bell 1986).

²⁷ Passon (2010, 55).

kung auf den empirisch-experimentellen Prüfstand gestellt werden konnte (siehe ausführlich Kapitel III.1).

Gehen wir an dieser Stelle nochmals auf die Bezugsprobleme ein, auf die die Bohmsche Mechanik eine Antwort zu geben sucht. Die Ensemble-Interpretation stellt den ontischen Status der Wellenfunktion infrage, hat dann aber das Problem, wie sich die Interferenz von Wahrscheinlichkeiten ohne ein wie auch immer geartetes Feldkonzept erklären lässt. Wir treffen hier auf Wellen, die eigentlich nicht existieren können. Die Kopenhagener Interpretation geht vom Kollaps der Wellenfunktion während einer Messbeobachtung aus, wobei jedoch nicht gesagt werden kann, an welcher Stelle der Schnitt in die Welt gemacht werden kann. Da der Messprozess prinzipiell auch quantenmechanisch beschrieben werden kann, lässt sich kein Beobachter *in* der Welt identifizieren, der solch einen Schnitt erzeugen könnte. Wir treffen hier auf ein Phänomen, das es nach dem reinen Formalismus der Quantentheorie eigentlich nicht geben kann.

Die Bohmsche Mechanik umschiftt diese beiden schwerwiegen- den epistemischen Probleme auf elegante Weise. Es *gibt* hier Teilchen und ebenso werden die mit der Wellenfunktion aufgespannten Feldbeziehungen als real betrachtet. Der problematische Kollaps der ψ -Funktion wird in dieser Beschreibung nicht benötigt.

Für diese Interpretation der Quantentheorie ist jedoch wiederum ein Preis zu zahlen. Die Welt erscheint nun als ein zusammenhängendes System, das auf komplexe Weise ineinander eingefaltet ist. Sie erscheint jetzt als eine *implizite* Ordnung, entsprechend der ein Geschehen an Ort A über die bestimmenden Kontextvariablen Einfluss auf prinzipiell jedes andere, noch so weit entfernte Geschehen an Ort B haben kann. Wir begegnen hier der Paradoxie des Holismus, die darin besteht, dass das Ganze nicht aus seinen Teilen bestehen kann, denn sonst könnten die Teile ja nicht Ausdruck des Ganzen sein. Die Paradoxie der Quantentheorie wird jetzt als *eingefaltete Ordnung* entfaltet, entsprechend der das Ganze gleichzeitig mit sich identisch und nicht identisch ist. Aus diesem Grunde kann eine solche Ordnung auch nicht explizit sein, denn mit der Differenz, welche die Beobachtung in der Welt macht, kann diese nicht als Ganzes erfasst werden. Jede Beobachtung teilt die Welt erneut in Beobachtetes und Nicht-Beobachtetes ein. An dieser Stelle wird auch deutlich, warum für Bohm der Dialog mit Jiddu Krishnamurti so attraktiv erscheint. Seine Theorieform zeigt offensichtlich Parallelen zu mystischen Figuren (siehe auch Kapitel VI).

David Bohms vielschichtige und gebrochene akademische Biografie hat eine Reihe wissenschaftshistorischer Untersuchungen inspiriert. Wir treffen hier auf einen jüdisch-amerikanischen Physiker, der in seiner Jugend mit kommunistischen und pazifistischen Bewegun-

gen sympathisiert hat und darüber hinaus schnell zur Elite der neuen US-amerikanischen Physik vordringt. Seine politische Orientierung bringt es jedoch mit sich, dass er aus dem Manhattan-Projekt ausgeschlossen wird, mit dem die Entwicklung der Atombombe vorangetrieben wurde. Nichtsdestotrotz entwickelte er sich zu einem angesehenen Physiker und veröffentlichte ein viel beachtetes Standardlehrbuch zur Quantenphysik. Er folgt hier zwar noch in weiten Teilen der Kopenhagener Schule, gibt aber den damit verbundenen erkenntnistheoretischen und philosophischen Problemen einen großen Raum.²⁸

In der McCarthy-Ära weigert sich Bohm, einige vermeintlich sozialistische Kollegen zu denunzieren. Dies führte zum Verlust seiner Lehrerlaubnis an der Princeton-Universität. Ihm blieb zunächst nichts weiter übrig, als nach Brasilien auszuwandern, was zugleich mit einem Ausschluss aus der fachwissenschaftlichen Gemeinde einherging. Hier begann Bohm intensiver über alternative Deutungen der Quantentheorie nachzudenken, wobei er sich offensichtlich auch durch Denkfiguren aus dem dialektischem Materialismus inspirieren ließ. Wenige Jahre später wechselte er an die Technische Universität von Haifa in Israel. Hier gelang ihm die Entdeckung eines weiteren merkwürdigen Quanteneffekts, der später unter der Bezeichnung Aharonov-Bohm-Effekt bekannt wurde. Hier konnte gezeigt werden, dass die Interferenz von Elektronen in einer merkwürdigen Art durch ein Magnetfeld beeinflusst wird, nämlich nicht durch die magnetische Kraft selber, sondern durch die Eigenschaften eines virtuellen Vektorfeldes. Die empirisch gefundenen Wechselbeziehungen lassen sich nur mit Hilfe der imaginären Anteile der Wellenfunktion erklären.²⁹

²⁸ Bohm (1951).

²⁹ Um die Sache mit Fischer zu erklären: »[E]in Magnetfeld kann den merkwürdigen (spezifisch quantenmechanischen) Vorgang beeinflussen, bei dem Elektronen miteinander interferieren, wie Wellen es tun. Und das Verwunderliche an dieser in der Literatur als Aharonov-Bohm-Effekt bekannten Quantensonderlichkeit besteht darin, dass sie nicht auf das (reale) Magnetfeld selbst zurückgeführt werden kann, sondern auf eine nicht messbare (unwirkliche) Größe, die Physiker in ihre Theorien eingeführt haben, um die mathematische Schreibweise zu vereinfachen. Sie nennen diesen irrealen Teil der Theorie ‚Vektorpotenzial‘ und leiten das (reale) Feld davon ab. Ein solcher Schritt in fast transzendenten Sphären musste gedanklich unternommen werden, weil sich der Aharonov-Bohm-Effekt im konkreten Versuch auch dann noch zeigt, wenn das Magnetfeld längst verschwunden ist, das heißt, wenn seine Stärke den Wert null erreicht hat und auf den Messgeräten nichts mehr angezeigt wird (was aber nicht bedeutet, dass da nicht doch noch etwas da sein könnte)« (Fischer 2010, 273f.). Siehe die Originalarbeiten Aharonov/Bohm (1959; 1961).

1961 wechselte Bohm schließlich an die Universität London, wo er die Idee einer holistischen Interpretation der Quantentheorie weiterverfolgte. Hier begannen auch seine Dialoge mit Jiddu Krishnamurti und in diesem Zusammenhang wandte er sich zunehmend philosophischen und spirituellen Fragen zu.³⁰

Bohms Wirken gibt viel Raum, darüber nachzudenken, inwie weit persönliche Lebensumstände und Theoriebildung miteinander wechselwirken. Es hat sicherlich einige Plausibilität, mit Forstner nach der Wechselwirkung zwischen Bohms früherer dialektisch-materialistischer Weltauffassung, seiner Suche nach alternativen Deutungsmöglichkeiten und seinem Ausschluss aus der Diskursgemeinschaft amerikanischer Physiker zu fragen.³¹ Doch auch hier ist letztlich anzunehmen, dass solch grobe äußere gesellschaftliche Dynamiken die inneren Bewegungen einer elaborierten physikalischen Theoriebewegung nicht wirklich determinieren können. Dass die Lektüre von Friedrich Engels ›Dialektik der Natur‹³² zur Beschäftigung mit erkenntnistheoretischen Fragen und der Suche nach einer deterministischen Theoriealternative inspirieren kann, ist eine Sache. Welche Konsistenzzwänge und inneren Anschlussoptionen sich aus einer komplexen physikalischen Theorie ergeben, stellt jedoch eine andere Geschichte dar.

Kehren wir deshalb im Sinne unseres Projektes wieder zum Referenzrahmen der Physik zurück und sehen in diesem Zusammenhang Bohms Leistung primär darin, die Idee klassischer Substantialität der Teilchen und die Ontologisierung von Schrödingers Wellenfunktion konsequent weiterverfolgt zu haben. Anstatt davon auszugehen, dass es Teilchen nur gibt, wenn sie beobachtet werden und dass Wellenfunktionen durch die Messbeobachtung kollabieren, generiert die Bohmsche Mechanik eine beobachterunabhängige und deterministische physikalische Theorie. Der Versuch, die Bezugsprobleme der Quantentheorie auf diesem Wege zu lösen, führt jedoch erneut zu bizarren Konsequenzen. Die Paradoxien der Kopenhagener Deutung werden hier zwar verschoben – anstelle des Beobachters erscheint jetzt eine nicht-lokale holistische Ordnung –, jedoch keineswegs einer Klärung zugeführt, welche die Rückführung in eine klassisch-physikalische Theoriekonzeption erlaubt.

³⁰ Siehe etwa Bohm (1988) und Krishnamurti/Bohm (1985).

³¹ Siehe hierzu Forstner (2005; 2007; 2008).

³² Engels (1962).

3 Viele-Welten-Interpretation: Die ψ -Funktion als einzige Realität

Die Idee der Paralleluniversen ist Stoff für zahlreiche Fantasie- und Science-Fiction-Romane. Solche Fantasien sind jedoch nicht Gegenstand der Arbeit eines Physikers, der an den Problemen der Quantentheorie arbeitet.

Sicherlich, es gibt auch Physiker, die mit ihren Schriften mit populärwissenschaftlichen Diskursen in Resonanz treten.³³ Doch hierin die eigentliche Arbeit des Physikers zu sehen, wäre ein Missverständnis, das darauf beruht, die Referenz der Wissenschaft mit dem Bezugssystem der Kunst oder den Massenmedien zu verwechseln. Die Währung innerhalb der Physik besteht weder in der Ästhetik einer phantastischen Konzeption noch in den Einschaltquoten eines Massenpublikums. In der Physik geht es um Theorieentwicklung auf Basis mathematischer und konzeptioneller Konsistenz. Anschlussfähig sind hier allein Arbeiten, die auf Basis der Rekombination etablierter Theoriefiguren und/oder aktueller empirischer Befunde neue Einsichten in den Gegenstand ermöglichen.

Dies gilt auch für die ‚Viele-Welten-Interpretation‘. Versuchen wir, uns im Folgenden aus einer innerphysikalischen Perspektive an diese Konzeption anzunähern.

Hugh Everett suchte Mitte der 1950er-Jahre in seiner Doktorarbeit an der Princeton University nach einer Lösung des quantenmechanischen Messproblems. Mit der Arbeit von v. Neumann lag eine gut ausgearbeitete Theorie der Quantenmechanik vor, mit deren Hilfe die Experimentalphysik immense Fortschritte gemacht hatte. In all den vielfältigen Entdeckungen und Einsichten, die hier gewonnen werden konnten, zeigte sich die Schrödinger-Gleichung als uneingeschränkt gültig. Die Quantentheorie rückte hiermit neben der allgemeinen Relativitätstheorie zunehmend in die Position einer allgemeinen Grundlagentheorie der Physik. Doch trotz ihrer immensen Erklärungskraft blieben zwei grundlegende Probleme bestehen. Zum einen lässt sich der Formalismus der Quantentheorie nicht ohne Weiteres mit der allgemeinen Relativitätstheorie in Einklang bringen. Zum anderen bleibt das Messproblem bestehen. Mit v. Neumann ist davon auszugehen, dass der Schnitt der Messung willkürlich gesetzt wird und entsprechend nur die Alternative bleibt, dass der mit dieser Entscheidung implizierte Wellenkollaps wirklich passiert, wenngleich dies in der in Hinblick auf den Zeitverlauf deterministisch angelegten Schrödinger-Gleichung selbst nicht vorgesehen ist. Wie bereits ge-

³³ Siehe etwa die populären Bücher von Stephen Hawking.

sagt, der Wellenkollaps kommt in der physikalisch-mathematischen Beschreibung nicht vor.

Everett nahm sich das letztere Problem vor und suchte intensiv nach einer Lösung, die ohne Hilfsannahmen auskommt, welche außerhalb des Formalismus der Schrödinger-Gleichung liegen. Auf diese Weise wollte er zu einer realistischen Interpretation der Quantentheorie gelangen, die darauf basiert, der Schrödinger-Gleichung in Hinblick auf die Weltbeschreibung einen ontologisch *objektiven* Status zuzuweisen. Entgegen der statistischen Interpretation durch Born und Popper würde die Wellenfunktion damit nicht nur eine Wahrscheinlichkeitsvorhersage für eine *mögliche* Entwicklung von Welt geben, sondern die *wirkliche* Entwicklung der Welt beschreiben.

Insofern man die Wellenfunktion des Universums kennen würde, wären damit die mathematische Beschreibung der Welt und die Welt selbst, also Reflexion und Sein, wieder eins. Es würde jetzt wieder die alte Regel des ausgeschlossenen Dritten gelten (*tertium non datur*). Sowohl der Einfluss der Beobachtung als auch die das Kausalitätsprinzip störenden Modaloperatoren würden wieder aus der Physik verschwinden. Die Grundbeschreibung der Welt wäre wieder eine realistische und deterministische.

Der Weg, den Everett hierbei einschlägt, ist im Prinzip einfach zu begreifen. Der Ausgangspunkt bleibt die Wellenfunktion ψ , welche jetzt aber die *ganze* Welt beschreibt. Everetts Trick besteht darin, all die mit der ψ -Funktion aufgespannten Möglichkeiten als manifestierte Realitäten aufzufassen. In der ›wirklichen‹ Welt, so die Annahme, werden alle durch ψ aufgespannten Optionen realisiert. Jeder Realitätsschnitt hat dann als Nachbarschaft andere Realitätsausschnitte, welche parallel zu ihm bestehen. Mit Dieter Zeh gesprochen, bilden Everetts ›Welten‹ daher »eine gewisse Analogie zu inhaltlich voneinander unabhängigen und getrennt betrachtbaren Radio- oder Fernsehsendungen, die alle gleichzeitig als *eine* elektromagnetische Welle den (hier dreidimensionalen) Raum füllen – nur daß in der globalen Quantenwelt der Zuschauer selber Teil einer der ›Sendungen‹ oder ›Welten‹ ist.«³⁴

Um im Beispiel von Schrödingers Katze zu bleiben: Die Wellenfunktion der zwei sich überlagernden Katzen spaltet sich in zwei alternative, jedoch auf einen gemeinsamen Grund zurückzuführende Geschichten auf, die sich nur in Hinblick auf ein Detail – den Tod der Katze – unterscheiden. Mit jeder neuen Messinteraktion, die eine Weichenstellung erzwingt, entstehen neue Parallelwelten und entsprechend beinhaltet die Gesamtwellenfunktion der Welt letztendlich eine unvorstellbare Anzahl von Parallelwelten, die alle gleichzeitig als ›real‹ zu betrachten sind, also entsprechend der Verschränkung ihrer

³⁴ Zeh (2010, 16).

Zustände relativ zueinander in einer bestimmten Beziehung stehen, wenngleich man ihre jeweilige Entwicklung in klassischen Begriffen auch getrennt beschreiben könnte. Aus diesem Grund wählte Everett für seine 1957 abgeschlossene Arbeit auch den Titel »*relative state formulation of quantum mechanics*«.³⁵

Als Preis für einen auf diese Weise wiedergewonnenen ›Realismus‹ der Physik ist nicht nur eine ebenso phantastische wie abstruse Weltauffassung in Kauf zu nehmen, sondern auch ein Splitting des Bewusstseins. Ein Experimentator, der die Kiste mit Schrödingers Katze öffnet, erlebt nur seine Welt, nicht jedoch die seines Doubles, das parallel hierzu einen anderen Ausgang des Experiments beobachten kann. Der Zufall entscheidet, welcher Wirklichkeitskontinuität sein individuelles Bewusstsein folgt. Die Kontingenz der Beobachtung bleibt also bestehen. Die Modaloperatoren und Ungewissheiten sind nicht verschwunden, werden jedoch an einen Ort verlagert, der einen objektivistischen Physiker nicht mehr zu stören braucht. Die Frage, ob ein Bewusstsein zufällig oder zwingend und notwendig etwas erlebt, fügt aus einer objektivistischen Perspektive einem objektiv verlaufenden Weltgeschehen nichts hinzu.³⁶ Die objektive Welt erscheint jetzt als universell gegebenes, absolutes Sein im Sinne der Summe aller mit der Wellenfunktion errechenbaren Parallelwelten. Das jeweilige Bewusstsein kann demgegenüber bestenfalls noch ein bruchstückhaftes Schattenbild der für es unbegreifbaren wirklichen Welt erheischen. Ihm bleibt nur noch ein minimalistischer Ausschnitt aus der Fülle alternativer Erlebenskontinuitäten, die alle gleichzeitig als gegeben anzusehen sind.³⁷

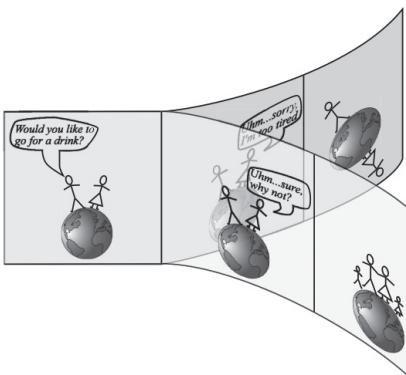


Abb. 12: Splitting einer Welt in zwei Parallelwelten.³⁸

³⁵ Everett (1957).

³⁶ Es erscheint jetzt bestenfalls noch als ein »non-efficacious« und »powerless by-product of the physical world«. So dann Jackendoff (1987, 26), der hiermit die objektivistische Perspektive auf die Spitze treibt.

³⁷ Streng genommen führt diese Auffassung dann auch zu einem Blockuniversum, in dem alle Zustände für alle Zeiten gleichzeitig bestimmt sind, denn innerhalb der deterministischen Wellenfunktion stellt die Zeit eine stetige Variable dar. Sie steht, wie Soler Gil (2007) beschreibt, nicht mehr im Einklang mit einer präsentistischen Auffassung von Zeit.

³⁸ Bildreferenz: Tegmark (2004, 8).

Die Viele-Welten-Theorie ist kontraintuitiv gegenüber unserer Welterfahrung. Doch sie lässt sich mathematisch und physikalisch in konsistenter Weise durchführen. Auf den ersten Blick scheint sie nicht mit dem Satz der Energieerhaltung in Einklang zu stehen, da ja mit der Vervielfachung der Welten auch die Beträge der Massen und Energien zu multiplizieren sind.³⁹ Dieses Problem lässt sich mit der *>relative state formulation<* jedoch recht einfach lösen, indem jeder realisierten Welt eine Gewichtung zugeordnet wird, die sich aus dem Wahrscheinlichkeitskalkül des Messpostulats ergibt. Mit jedem neuen Splitting würde aufgrund der zusätzlichen Welten die Gewichtung einer einzelnen Welt abnehmen. Die Summe aller Welten würde dann weiterhin 100 % der gesamten Masse und Energie des Universums ergeben. Ebenso lässt sich die Viele-Welten-Theorie in Einklang mit den Hauptsätzen der Thermodynamik formulieren. Nicht zuletzt lässt sie sich ohne Weiteres in die Dekohärenztheorie einbetten,⁴⁰ mit deren Hilfe sich der Übergang von der Quantenwelt zu den stabilen Phänomenen der klassischen Welt recht gut erklären lässt (siehe ausführlich Kapitel IV.4).

Die Viele-Welten-Theorie erlaubt darüber hinaus, den nicht-lokalen Charakter der ψ -Funktion anzuerkennen, ohne dabei von der Übertragung von Information mit Überlichtgeschwindigkeit ausgehen zu müssen. Eine Messung an einem verschränkten Quantenobjekt *>splittet<* die Welt in zwei weitere Parallelwelten. Eine weitere Messung an den konjugierten Teilchen führt dann zu einer weiteren Spaltung, so dass sich die Messkonstellationen auf vier Welten verteilen, die von ihrer Geschichte her konsekutiv zusammenhängen. Auf diese Weise lässt sich die Korrelation einer Messung an zwei verschränkten Quantenteilchen erklären, ohne dass auf eine rückwärtslaufende Kausalität, ein Zeitloop, den Einfluss eines Beobachters oder einer simultanen Fernübertragung von Information zurückgegriffen werden muss.

Anders als im Holismus der Bohmschen Mechanik hätte die Messinteraktion hier keine Auswirkungen auf ferne Regionen der Welt, sondern würde zu einer Spaltung in mehrere Welten führen, in denen bis auf die lokalen Abweichungen alles gleich bleibt. Um im Beispiel von Schrödingers Katze zu bleiben, die Weichenstellung Katze tot/lebendig führt hier nur zu lokalen Wirkungen, nicht jedoch zu einer Veränderung weit entfernter Weltzustände.

Was die Viele-Welten-Theorie für den Physiker und den Mathematiker attraktiv erscheinen lässt, ist ihre interne Konsistenz und

³⁹ Energie und Masse sind hier entsprechend der Einsteinschen Formel $E=mc^2$ natürlich als äquivalent und ineinander überführbar zu sehen.

⁴⁰ Vgl. Joos/Zeh (1984).

Einfachheit. Weder braucht man der Schrödinger-Gleichung weitere Formalismen hinzuzufügen noch wird das objektivistische Weltbild durch eine Beobachterproblematik oder nicht-klassische Kausalitäten gestört.⁴¹

Dem Common Sense unseres Alltagsbewusstseins kommt die Bohrsche Auffassung der komplementären Welle-Teilchen-Beschreibung entgegen, während uns die Idee der Parallelwelten bestenfalls als Science Fiction geeignet erscheint. Aus physikalischer Perspektive kehren sich für Dieter Zeh jedoch die Verhältnisse um:

»Denn während Science Fiction sich über die Naturgesetze hinwegsetzt, sind die Vielen Welten gerade eine Konsequenz der allgemeinsten und bestgeprüften Gleichung der Physik (der Schrödingergleichung). Um sie zu vermeiden, muß man diese Gleichung willkürlich abändern oder ergänzen, so daß man eigentlich die Copenhagener Interpretation als Science Fiction bezeichnen müßte.

Die verschiedenen ›Welten‹ der Quantentheorie, die sich aus der Schrödinger-Gleichung ergeben, bilden also eine dynamische Einheit. Sie werden als Konsequenz dieser Dynamik erst näherungsweise unabhängig, wobei sie in scheinbar instantanen Ereignissen (›Quantensprünge‹) als unabhängige Welten entstehen – wie die Bruchstücke einer kontinuierlich ablaufenden Explosion. Somit ist es auch falsch, der Viele-Welten-Interpretation die Behauptung zu unterstellen, daß alle denkbaren Welten existieren. Nach dieser Vorstellung existieren vielmehr nur solche Welten,

⁴¹ Anders als in der Ensemble-Interpretation werden die nicht-lokalen Eigenschaften der ψ -Funktion zwar anerkannt und entsprechend explizit berücksichtigt, bleiben aber dann im Ensemble der Parallelwelten verborgen. In der jeweiligen Einzelwelt erscheinen jedoch nur lokal wirkende Gesetzmäßigkeiten. »Die nichtlokale Wellenfunktion kann also nicht einfach statistische Korrelationen auf Grund unvollständiger Information (hier über noch nicht gemessene Spinwerte) beschreiben. Da die Detektoren mit den zugehörigen Magnetfeldern zudem beliebig weit voneinander entfernt sein dürfen, wären im Prinzip nur noch mysteriöse, überlichtschnelle Wechselwirkungen zwischen ihnen zur Erklärung möglich (von Einstein, dem nichtlokale Zustände fremd waren, als ›spukhafte Fernwirkung‹ bezeichnet). Es sei daher betont, daß auch die Quantentheorie keine beobachtbaren nichtlokalen oder superluminalen kausalen Einflüsse erlaubt, also insbesondere die kausale Raumzeitstruktur, die durch die Grenzgeschwindigkeit des Lichts definiert wird, respektiert. Sie benötigt aber gar keine Fernwirkungen, da sie bereits nichtlokale Zustände voraussetzt, die ihrerseits die Grundlage der ›Vielen Welten‹ bilden« (Zeh 2010, 22).

die sich deterministisch aus einer bestimmten Anfangsbedingung der universellen Wellenfunktion (z. B. beim Urknall) gemäß der Schrödinger-Gleichung entwickelt haben. Wohlgemerkt gibt es an diesen Konsequenzen überhaupt keinen Zweifel, wenn man die Schrödinger-Gleichung uneingeschränkt akzeptiert, was wie jede Kosmologie eine Hypothese ist. Die von den meisten Physikern vertretenen gegenteiligen Ansichten beruhen dagegen nur auf ihren traditionellen, der klassischen Alltagserfahrung entstammenden pragmatischen Vorstellungen und nicht der empirisch begründeten fundamentalen Theorie.“⁴²

Die Viele-Welten-Interpretation legt nicht *per se* eine bestimmte epistemische Haltung fest. Sie lässt sich sowohl unter einem positivistischen als auch einem realistischen Pramat begreifen. Ersterem entsprechend sieht man die Schrödinger-Gleichung als die derzeit einzige akzeptable Rechenvorschrift an, beschäftigt sich dann allerdings nicht mit der Frage, ob es die multiplen Universen ›wirklich‹ gibt. Es reicht hier aus, mit der empirischen Evidenz zu arbeiten, dass es unsere Welt gibt.⁴³ Die anderen Realisierungsmöglichkeiten werden dann hypothetisch einfach mitgeführt, um in konsistenter Weise mit dem Formalismus der Quantentheorie arbeiten zu können.⁴⁴ Der realistischen Perspektive folgend sieht man demgegenüber auch die Parallelwelten als existent an und denkt entsprechend über mögliche

42 Zeh (2010, 5 f.).

43 »Müssen alle ›Welten‹ tatsächlich existieren? Das müssen sie sicher nicht. Nur ihre Konsequenzen sowie Argumente der Ökonomie der Beschreibung können über die Berechtigung der Annahme ihrer Existenz entscheiden. Wenn wir innerhalb der Viele-Welten-Vorstellung die Tatsache akzeptieren, daß wir als lokale Beobachter nach dem Eintreten eines Dekohärenzereignisses (etwa bei der Messung eines mikroskopischen Objektes) subjektiv in *einer* der dabei voneinander unabhängig gewordenen Komponenten des Quantenuniversums leben, könnten wir ebensogut auch annehmen, daß alle anderen von *nun an* nicht mehr ›existieren‹ – auch wenn wir im Experiment niemals eine objektive Modifikation der Schrödinger-Gleichung nachweisen können. Dies scheint sogar die ökonomischere Annahme zu sein, für die deswegen oftmals ›Occams Rasiermesser‹ ins Feld geführt wird, mit dem man alles Überflüssige und nicht Nachprüfbare aus unserem Weltbild entfernen soll« (Zeh 2010, 11).

44 Gerade in kosmologischen Anwendungen der Quantentheorie gilt dann oftmals der Befund, dass die Anwendung von Parallelweltensembles die Rechnungen und Modelle einfacher macht als der Versuch, mit individuierten Universen zu arbeiten. Vgl. Tegmark (1996).

experimentelle Anordnungen nach, welche Hinweise bezüglich deren Existenz sich ergeben könnten.⁴⁵

Ebenso sind verschiedene ontologische Auffassungen mit der Viele-Welten-Theorie vereinbar. Entsprechend einer aristotelischen Sichtweise kann der primäre Referenzrahmen die erfahrbare Welt bleiben, die dann jedoch mit den mathematischen Hilfsmitteln der Schrödinger-Gleichung leichter beherrschbar wird. Hier würde es sich allein schon aus pragmatischen Gründen anbieten, die Dinge nicht komplizierter zu machen, als sie sind. Es hätte keinen Sinn, die Rechnung durch zusätzliche unnötige Postulate zu verkomplizieren, da ja sowie nicht davon auszugehen ist, dass die theoretische Idee mit der erfahrbaren Welt vollkommen in Einklang zu bringen ist.⁴⁶

Im Sinne einer platonischen Betrachtungsweise ließe sich aber auch das Universum mit der mathematischen Idee der Quantentheorie gleichsetzen. Man hätte nun davon ausgehen, dass das Universum gleichsam ein riesiger (Quanten-)Computer sei, der nach dem Formalismus einer noch zu findenden »Theory of Everything«⁴⁷ die Welt errechnet.⁴⁸ Die *Idee* der Theorie und die Wirklichkeit werden hiermit eins. Das, was wir mit unseren Sinnen von der Welt erfahren können, wäre demgegenüber nichts weiter als eine illusionäre Anschauung über die Welt. Den einzigen Ausweg aus dem Gefängnis einer solchermaßen beschränkten Erkenntnis kann aus dieser Perspektive nur die Mathematik liefern, da sich nur mit ihrer Hilfe eine

⁴⁵ Ein Vorschlag besteht darin, Quantencomputer so zu präparieren, dass sie in verschiedenen Welten gleichzeitig rechnen müssten, wodurch dann indirekt auf die Existenz dieser Welten geschlossen werden könnte. Eine andere Idee beruht auf der Vermutung, dass die Gravitationskraft durch die Parallelwelten dringen könnte und sich entsprechende Effekte zeigen könnten, bzw. wäre dann ggf. sogar eine Kommunikation zwischen zwei Welten möglich, falls es gelingen würde, Gravitationswellen zu generieren und zu detektieren (vgl. Deutsch 1986; und Plaga 1997). All diese Vorschläge können derzeit experimentell (noch) nicht realisiert werden.

⁴⁶ Dies würde dann etwa auch gegen die Bohmsche Theorie sprechen. Da der Schrödinger-Gleichung mit der Führungsgleichung ein zweiter Formalismus hinzugefügt wird, wird die Rechnung unnötigerweise verkompliziert, ohne dass hierdurch in pragmatischer Hinsicht etwas gewonnen wäre. In der Tat wird die Bohmsche Mechanik sehr schnell sehr kompliziert.

⁴⁷ Tegmark (2004, 12). Aus Perspektive der theoretischen Physik stellt sich hier vor allem das Problem, wie die allgemeine Relativitätstheorie mit der Quantenfeldtheorie verbunden werden kann.

⁴⁸ Siehe etwa Lloyd (2005).

formale Abstraktion gewinnen lässt, die den Common-Sense-Bereich unserer Alltagserfahrungen überwinden kann.⁴⁹

Unabhängig wie man nun epistemisch oder ontologisch zur Viele-Welten-Theorie steht, aus Perspektive der Physik besteht ihr Charme darin, dass sie konzeptionell recht einfach ist und durch die Auslagerung des Zufalls in die vermeintlich subjektive Sphäre des Bewusstseins all jenen unangenehmen Problemen aus dem Weg geht, die sich aus einer Einbeziehung des Beobachters in das Kalkül ergeben würden. In diesem Sinne lässt sich dann auch Tegmarks Alternative

⁴⁹ Hier das emphatische Plädoyer von Tegmark für das platonische Paradigma: »Yet there is a still deeper underlying question: there are two tenable but diametrically opposed paradigms regarding physical reality and the status of mathematics, a dichotomy that arguably goes as far back as Plato and Aristotle, and the question is which one is correct.

ARISTOTELIAN PARADIGM: The subjectively perceived frog perspective is physically real, and the bird perspective and all its mathematical language is merely a useful approximation.

PLATONIC PARADIGM: The bird perspective (the mathematical structure) is physically real, and the frog perspective and all the human language we use to describe it is merely a useful approximation for describing our subjective perceptions.

What is more basic – the frog perspective or the bird perspective? What is more basic – human language or mathematical language? Your answer will determine how you feel about parallel universes. If you prefer the Platonic paradigm, you should find multiverses natural, since our feeling that say the Level III multiverse is ›weird‹ merely reflects that the frog and bird perspectives are extremely different. We break the symmetry by calling the latter weird because we were all indoctrinated with the Aristotelian paradigm as children, long before we even heard of mathematics – the Platonic view is an acquired taste! In the second (Platonic) case, all of physics is ultimately a mathematics problem, since an infinitely intelligent mathematician given the fundamental equations of the cosmos could in principle compute the frog perspective, i.e., compute what self-aware observers the universe would contain, what they would perceive, and what language they would invent to describe their perceptions to one another. In other words, there is a ›Theory of Everything‹ (TOE) at the top of the tree [...] whose axioms are purely mathematical, since postulates in English regarding interpretation would be derivable and thus redundant. In the Aristotelian paradigm, on the other hand, there can never be a TOE, since one is ultimately just explaining certain verbal statements by other verbal statements – this is known as the infinite regress problem« (Tegmark 1996, 11).

›viele Worte‹ oder ›viele Welten‹ und seine eindeutige Präferenz für Letzteres nachvollziehen.⁵⁰

Auch physikalisch konzeptionell lässt sich die Idee der Multiversen – so bizarr sie auf den ersten Blick auch anmutet – recht einfach und ohne größere gedankliche Akrobatik vorstellen. Unser Alltagsdenken ist bereits darauf angelegt, alternative realistische Geschichten als Optionen vergangener Entscheidungssituationen mitzuführen.⁵¹ Als ob- und ›was wäre, wenn-‹ Figuren stellen längst vertraute Semantiken dar, die wir alltäglich nutzen, um in unseren Narrativen fiktive Wirklichkeiten zu generieren.⁵² Nicht nur aus mathematischen Gründen, sondern auch in Hinblick auf ihre semantisch recht einfache physikalisch konzeptionelle Seite stellt die Viele-Welten-Interpretation eine durchaus anschlussfähige Theorieoption dar. Während man nur schwerlich eine Anschauung von einer Bohmschen Mechanik gewinnen kann, in der Teilchen keine individuierbaren Eigenschaften mehr besitzen und stattdessen in eine implizite Ordnung eines holistischen Universums eingebettet sind, zeichnen sich die Everettischen Welten weiterhin durch die uns vertrauten klassischen Eigenschaften aus.

Die Viele-Welten-Theorie kann all dies leisten, jedoch ist hierfür ein sehr hoher Preis zu zahlen. Sie muss einen wesentlichen Aspekt quantenphysikalischer Experimente in die Subjektivität der vermeintlichen Beobachter verschieben. Sie führt gleichsam zu einem absolu-

⁵⁰ »We have seen that a common feature of all four multiverse levels is that the simplest and arguably most elegant theory involves parallel universes by default, and that one needs to complicate the theory by adding experimentally unsupported processes and ad hoc postulates (finite space, wavefunction collapse, ontological asymmetry, etc.) to explain away the parallel universes. Our aesthetic judgement therefore comes down to what we find more wasteful and inelegant: many worlds or many words. Perhaps we will gradually get more used to the weird ways of our cosmos, and even find its strangeness to be part of its charm« (Tegmark 1996, 18). Siehe auch Tegmark (1997).

⁵¹ Wir begegnen hier jener eigentümlichen Semantik des Entscheidens, entsprechend der die Vergangenheit ein Reservoir alternativer Weltoptionen beherbergt, während die Zukunft durch die Entscheidung auf einen einzelnen Pfad festgelegt wird. Vgl. Luhmann (2000b, 123–182).

⁵² Die Wahrscheinlichkeitsrechnung erzeugt per se eine Verdoppelung der Wirklichkeitsbeschreibung und lässt sich entsprechend einerseits als eine Fiktion auffassen, die vieles mit literarischen Gattungen gemein hat, sich dann aber von diesen in Hinblick auf den Charakter der Realitätskonstruktion dahingehend unterscheidet, als dass sie als wissenschaftliche Fiktion sozusagen eine realere Fiktion darstellt. Vgl. Esposito (2007).

ten subjektivistischen Zufall, dem nun eine ebenso absolut zu verstehende objektivistische Welt unvereinbar gegenübersteht. Wenngleich mit dem hohen Anspruch angetreten, auf den störenden Schnitt in die Welt verzichten zu können, den die Kopenhagener Deutung in die Physik einführt, wird hier der Riss in der Welt über die Totalisierung der Subjekt-Objekt-Dichotomie fast noch radikaler zementiert.

Die lokale Kausalität und der Determinismus der physikalischen Welt werden hier gerettet, indem Kontingenz und Zufall als eine Illusion subjektiver Beobachter denunziert werden. *Nolens volens* begegnen wir hier der Paradoxie, dass die Tatsache der subjektiven Beobachtung und damit der Relativität des gewählten Referenzpunktes zugleich vorausgesetzt wie auch negiert werden muss. Auch der Viele-Welten-Theoretiker hat nichts anderes zur Verfügung als die Daten einer erlebten Welt, die sich dann jedoch fälschlicherweise nur als einer Welt zugehörig zeigen. Die vermeintlich eindeutige Trennung zwischen einem subjektiven Bereich, wo der Zufall herrscht, und einer objektiven Welt, in der die Wellenfunktion des Universums in deterministischer Manier das Weltverhalten darstellt, kollabiert hiermit. Auch wenn es formal abgestritten wird, treten also auch in der Viele-Welten-Theorie zirkuläre Begründungsverhältnisse auf.

Innerhalb der Theoriediskussion der Quantenphysik ist dieses Dilemma durchaus bekannt und wird unter dem Stichwort ‚*preferred basis problem*‘ diskutiert. Im Prinzip handelt es sich hierbei um die Frage, wie in einer Welt, in der ja alles miteinander verschränkt gesehen werden kann, die Trennlinie zwischen der Superposition zweier Quantenzustände und der Trennung in zwei alternative Welten *gesetzt* werden kann. Beispielsweise können beim Doppelspaltexperiment die beiden Wegealternativen ‚rechter Spalt‘ und ‚linker Spalt‘ solange einer Welt zugehörig betrachtet werden, bis eine Messung die Weginformation bestimmt. Entsprechend der Everett-Theorie würde hier eine Spaltung in zwei Welten eintreten müssen, die dann beide als real zu betrachten sind. Eine Messung – so die übliche Hilfsannahme – würde jetzt sozusagen eine Verschränkung auflösen und zu zwei klassischen Zuständen in zwei unterschiedlichen Welten führen.⁵³

Die Dekohärenz von Quantenzuständen durch Interaktionen mit anderen physikalischen Systemen ist zwar empirisch vielfältig bestätigt,⁵⁴ der Übergang zur klassischen Welt lässt sich jedoch nicht allein auf der hier vorgeschlagenen Basis erklären. Wenn man nämlich die Messinstrumente jetzt ebenfalls auf Basis der Schrödinger-Gleichung beschreiben würde, ergibt sich mit der Messinteraktion

⁵³ So dann etwa Deutsch (1985), der das *preferred basis problem* unter anderem mit Hilfe dem Prinzip der *decoherence* erklärt.

⁵⁴ Vgl. Joos und Zeh (1984).

eine weitere Superposition, also wiederum ein gemischter Zustand, der nicht in eine scharfe klassische Lösung einrastet, sondern irgendwie verschmiert wäre. Um diesen Zustand zu bestimmen, bedürfte es wiederum einer Messinteraktion. Letztere wäre aber wiederum ein Quantenzustand, der entsprechend definiert werden müsste. Auf diese Weise kommen wir – insofern wir weiterhin von einer universell gültigen *Schrödinger-Gleichung* ausgehen, zu einem infiniten Regress, der jedoch nicht zur Ausflaggung realer Welten, sondern sukzessive von einem gemischten Zustand zu einem anderen verschmierten Zustand führt.⁵⁵

Der Viele-Welten-Theorie bleibt an dieser Stelle nichts anderes übrig, als die Wahl der Basis in die Subjektivität irgendeines Beobachters zu legen, was dann jedoch eine Vielzahl anderer Probleme nach sich zieht. Angefangen beim Solipsismusproblem, über die Auseinandersetzung darüber, ob verschiedene Beobachter miteinander verschränkt sein können, bis hin zur Frage, ob man sich auch Tierkollektive als Beobachter vorzustellen habe, die an der Produktion sich teilender Welten beteiligt sind,⁵⁶ bleibt die Frage des Beobachters virulent. Das ausgeschlossene Dritte tritt unweigerlich wieder in das Kalkül mit ein.

Das Bezugsproblem der Kopenhagener Deutung wird hier gleichsam an eine Stelle verschoben, die für den praktischen Physiker zunächst unproblematisch erscheint, da die Psyche nicht sein Forschungsgegenstand ist. Der mit der Beobachtung erfolgende Schnitt findet jetzt gleichsam außerhalb – meta – der Physik statt. Dieser Trick kann die Deutungsproblematik jedoch nicht wirklich beruhigen.

⁵⁵ Siehe zu einer ausführlichen Kritik an der Everettischen Position in Hinblick auf das *preferred basis problem* Stapp (2002).

⁵⁶ Siehe zur Illustration Barret: »The preferred basis problem is arguably a more serious problem for a splitting-worlds reading of Everett. In order to explain our determinate measurement records, the theory requires one to choose a preferred basis so that observers have determinate records (or determinate experiences) in each term of the quantum-mechanical state as expressed in this basis. The problem is that not just any basis will do this. Making the total angular momentum of all the sheep in Austria determinate by choosing such a preferred basis to tell us when worlds split, would presumably do little to account for the determinate memory I have concerning what I just typed. But this is the problem, we do not really know what basis would make our most immediately accessible physical records, those records that determine our experiences and beliefs, determinate in every world. The problem of choosing which observable to make determinate is known as the preferred-basis problem« (Barret 2011).

gen, da hierdurch streng genommen der Anspruch auf eine monistische Erklärung der Welt aufgegeben werden muss, denn das Subjekt, mit dem der Schnitt erfolgt, erscheint jetzt nicht mehr als Teil der physikalischen Welt. Auch hier begegnen wir nur einer Problemverschiebung, finden also keine Lösung des Deutungsproblems der Quantentheorie vor.

4 Entfaltungen der Paradoxie einer nicht-klassischen Theorie

In den vorangehenden Ausführungen wurden drei Alternativen zur Kopenhagener Deutung der Quantentheorie vorgestellt. Sie bauen alle auf dem mathematischen Formalismus der Schrödinger-Gleichung auf, entwickeln aber jeweils einen eigenständigen konzeptionellen Rahmen und verwerfen die physikalisch-anschauliche Intuition der Kopenhagener Deutung, dass die Messbeobachtung den Kollaps der Wellenfunktion bewirke und auf diese Weise eine Welt von Tendenzen und Möglichkeiten in die klassischen Wirklichkeiten definiter Zustände überführe.

Die Ensemble-Theorie geht vom Teilchenbild als ontologischer Basis aus, um mit Hilfe statistischer Überlegungen den Beobachter zu bannen. Die Wahrscheinlichkeiten der ψ -Funktion erscheinen jetzt als objektive Eigenschaften streuernder Teilchen. Das Dilemma bleibt jedoch, dass diese Ensembles in Hinblick auf konjugierte Wahrscheinlichkeiten miteinander verschränkt sind, also eine Beziehung angenommen werden muss, welche die in der klassischen Beschreibung vorausgesetzte Individualität der beteiligten Teilchen wieder infrage stellt.

Die Bohmsche Mechanik wählt einen ontologischen Ausgangspunkt, entsprechend dem sowohl die Teilchen als auch die sie steuernde Führungswelle als »real« betrachtet werden. Die konsequente Durchführung dieser Idee führt zu einem holistischen Universum, entsprechend dem die Eigenschaften von Teilchen als hochgradig kontextualisiert, das heißt auf nicht-lokale Weise mit dem gesamten Universum verbunden sind.

Die Viele-Welten-Theorie geht demgegenüber vom ontologischen Primat der durch die Schrödinger-Gleichung aufgespannten Wellenfunktion aus. Das Wahrscheinlichkeitskalkül wird hiermit aus der objektiven physikalischen Beschreibung getilgt, tritt allerdings als ausgeschlossenes Drittes über das Postulat des subjektiven Zufalls wieder in die Welt mit ein. Ebenso schleicht sich der ausgeschlosse-

ne Beobachter über das Problem der zu wählenden Basis erneut ins physikalische Kalkül.

Alle drei vorgestellten Alternativen zeigen sich hiermit als eine Entfaltung der Paradoxien einer nicht-klassischen Theorieanlage. Der eigenwillige Charakter der Quantentheorie wird hier also mehr bestätigt denn beruhigend in klassische Gefilde überführt.

Die Ensemble-Theorie sucht nach klassischen Kausalitäten und gelangt zu konjugierten komplexen Wahrscheinlichkeitsbedingungen. Die Suche nach lokalen Kausalitäten führt zur Notwendigkeit einer translokalen Betrachtungsweise (vollends deutlich wurde dies mit den experimentellen Studien zum Bell-Theorem; siehe Kapitel III.1).

Die Viele-Welten-Theorie sucht die Rückkehr zu einer objektivistischen Beschreibung der Physik. Doch sie reifiziert damit nur die Rolle des Beobachters, indem sie erneut den Schnitt zwischen der klassischen Welt und der Quantenwelt legen muss.

Die Bohmsche Mechanik sucht den Realismus und begegnet einer holistischen Weltdynamik, die jeglicher Vorstellungskraft spottet und bestenfalls noch mit transzendenten Begriffen umschrieben werden kann.

Sowohl die Ensemble-Interpretation als auch die Viele-Welten-Theorie verwenden klassische physikalisch-konzeptionelle Anschauungsweisen. Selbstreferenz kommt hier als Theoriefigur nicht vor. Inwieweit die Bohmsche Mechanik in der Lage ist, einen anderen epistemischen Zugang zu bieten, kann an dieser Stelle nicht überprüft werden, da hierfür tiefer auf die Fortentwicklungen und Potenziale dieser Theorie eingegangen werden müsste.

Als Soziologen sind wir nicht gezwungen, in epistemischer oder ontologischer Hinsicht Partei zu ergreifen, sondern können abstrahierend auf die Theoriebewegungen schauen. Wir sehen, dass die Versuche einer Begründung der Quantentheorie auf Basis festgezurrter ontologischer Prämissen zu Paradoxien führen. Wir vermuten an dieser Stelle, dass dies mit der Charakteristik und der Theoriebauweise der Quantentheorie selbst zu tun hat. Wir nehmen an, dass dies in ihrer Theoriearchitektonik gegründet ist, nämlich darin, dass sie selbstreferentiell und damit paradox gebaut ist. Wir vermuten ferner, dass dies keinen Mangel darstellt, sondern erst auf diese Weise eine hinreichende Auflösungsfähigkeit möglich wird, um komplexe physikalische Realitäten angemessen modellieren zu können.

Bevor wir diesen Vermutungen ausführlicher nachgehen können (in Kapitel VII), lohnt es sich, zunächst etwas ausführlicher auf jene Ergebnisse aus der Experimentalphysik einzugehen. Diese sind für die Interpretation und das gegenwärtige Verständnis der Quantenphysik von hoher Relevanz und haben die Mehrzahl der Physiker letztlich

dazu gebracht, den nicht-klassischen Charakter der Quantentheorie als Grundlage des modernen Physikverständnisses anzuerkennen.

Hiermit verlagert sich mehr und mehr das Bezugsproblem der Physiker. Nicht mehr die Quantenwelt, sondern das Erscheinen von Objekten, die den Gesetzen der klassischen Physik folgen, erscheint jetzt erklärbungsbedürftig. Im anschließenden Kapitel werden einige aktuellere Varianten der Interpretation der Quantentheorie vorgestellt, die sich daran abarbeiten, den Übergang zwischen der Quantenwelt und der klassischen Welt erklären zu können.