

Michael Esfeld

Der Holismus der Quantenphysik: seine Bedeutung und seine Grenzen

(erschienen in *Philosophia Naturalis* 36 (1999), S. 157–185)

Summary

This paper develops a new suggestion for a philosophical characterization of quantum holism by combining the basic ideas of the proposals which exist in the literature: Quantum holism consists in non-separability in the sense that the parts of a quantum whole have some of the properties which make something a quantum system only taken together. Consequently, there are non-supervenient relations among the parts of a quantum whole, and a quantum whole has physically significant properties which do not supervene upon the non-relational properties of its parts. Going into the scope of quantum holism, I argue in the last part of the paper that it is most plausible to regard quantum holism as being limited to more or less the microphysical realm; otherwise, a commitment to hotly disputed positions in epistemology and semantics ensues.

1. Einleitung

Weit über die Fachdiskussion in der Philosophie der Physik hinaus wird mit der Quantenphysik ein Holismus verbunden. Aus diesem Holismus werden in der populärwissenschaftlichen Literatur zum Teil Konsequenzen gezogen, die bis zu einer neuen Weltanschauung hinreichen. Vor diesem Hintergrund verfolge ich mit diesem Aufsatz zwei Ziele: Erstens möchte ich eine präzise begriffliche Charakterisierung desselben vorschlagen, was als Holismus in der Quantenphysik gilt. Zweitens möchte ich die Grenzen dieses Holismus einschätzen.

Ich rufe zunächst in Erinnerung, was die Grundlage für Holismus in der Quantenphysik ist (Abschnitt 2). Dann nehme ich die Vorschläge auf, die es in der Literatur für eine begriffliche Charakterisierung des Quanten-Holismus gibt. Ich argumentiere, daß keiner dieser Vorschläge zureichend ist, jeder von ihnen aber einen zutreffenden Grundgedanken enthält. [158] Ich führe dann diese Grundgedanken zusammen in einem eigenen, neuen Vorschlag für eine begriffliche Charakterisierung des Holismus der Quantenphysik (Abschnitt 3).

Was das zweite Ziel dieses Beitrags betrifft, die Grenzen des Holismus der Quantenphysik zu bestimmen, so argumentiere ich, daß die Quantenphysik uns zu einer tiefgreifenden Revision weitverbreiteter Vorstellungen über den mikrophysikalischen Bereich nötigt. Betrifft der Quanten-Holismus aber nur den mikrophysikalischen Bereich? Oder erstreckt er sich in Wirklichkeit auf alles Physikalische? Diese Frage kann nicht durch Verweis auf den heutigen Stand der Physik entschieden werden. Ich argumentiere für folgendes: Wenn wir den Quanten-Holismus so einschätzen, daß er sich auf den gesamten physikalischen Bereich bezieht, dann sind wir auf sehr problematische Konsequenzen in der Erkenntnistheorie festgelegt. Diese Konsequenzen sind ein gewichtiges Argument dafür, den Quanten-Holismus so anzusehen, daß er auf mehr oder weniger den mikrophysikalischen Bereich beschränkt ist.

Meine Ausführungen setzen keine Vertrautheit mit dem Formalismus der Quantentheorie voraus. Ich bemühe mich, technische Details so weit wie möglich zu vermeiden. Ich

entwickle meinen Vorschlag für eine Charakterisierung des Quanten-Holismus anhand der bekannten einfachen Beispiele für Zustandsverschränkungen in der Quantenmechanik.¹

2. Worin besteht der Holismus der Quantenphysik?

Rufen wir kurz in Erinnerung, was die physikalische Grundlage dessen ist, von Holismus in der Quantenphysik zu sprechen. Betrachten wir das einfachste Beispiel, das auf Bohm, 1951, S. 611–622, zurückgeht: Der Spin ist eine physikalische Eigenschaft, die nur in der Quantentheorie behandelt wird. Es gibt Systeme mit Spin 1/2 wie zum Beispiel Elektronen und Neutronen. Bei diesen Systemen kann der Spin in jeder der drei orthogonalen Raumrichtungen nur zwei mögliche definite numerische Werte annehmen. Nennen wir diese Werte „Spin plus“ und „Spin minus“. Betrachten wir nun ein Ganzes, das aus zwei solchen Systemen besteht, die miteinander so korreliert sind, daß dann, wenn das eine System Spin plus in einer gegebenen Richtung hat, das andere System Spin minus in dieser Richtung hat. Bezeichnen wir diese Systeme als System 1 und System 2. Der Zustand des Ganzen kann einfach das Produkt der Zustände der beiden [159] Teile sein. In diesem Fall sprechen wir von einem Produktzustand. Es gibt zwei Möglichkeiten: (1) System 1 hat Spin plus und System 2 Spin minus, oder (2) System 1 hat Spin minus und System 2 Spin plus:

$$(1) \quad \Psi = \Psi_1^+ \otimes \Psi_2^-$$

$$(2) \quad \Psi = \Psi_1^- \otimes \Psi_2^+$$

In diesen Formeln steht Ψ für den Spin-Zustand des Ganzen, und Ψ_1 und Ψ_2 stehen für die Spin-Zustände der beiden Teile; + bedeutet „Spin plus“, – „Spin minus“. Wenn sich das Gesamtsystem im Zustand (1) oder (2) befindet, dann ist nicht nur das Gesamtsystem in einem reinen Zustand, sondern auch die beiden Teile sind je für sich in einem reinen Zustand: jedes der beiden Teile ist in einem Zustand von entweder Spin plus oder Spin minus. Das muß jedoch nicht so sein. Das Gesamtsystem kann sich auch in einem Zustand befinden, der eine Überlagerung (Superposition) der Zustände (1) und (2) ist. Betrachten wir folgenden Zustand, den *Singulett-Zustand*:

$$(3) \quad \Psi = 1/\sqrt{2} (\Psi_1^+ \otimes \Psi_2^- - \Psi_1^- \otimes \Psi_2^+)$$

Es gibt keine Möglichkeit, diesen Zustand als Produktzustand aufzuschreiben. Nur das Ganze ist in einem reinen Zustand. Keines der beiden Teile ist in einem Zustand von entweder Spin plus oder Spin minus in irgendeiner Raumrichtung.

Die einschlägigen Experimente arbeiten fast alle nicht mit Systemen von Spin 1/2, sondern mit Photonen. Photonen verhalten sich in bezug auf die hier relevanten Aspekte wie Systeme von Spin 1/2. In den einschlägigen Experimenten wird je ein Paar solcher Systeme von einer Quelle emittiert, und die beiden Systeme entfernen sich nach der Emission in entgegengesetzte Richtungen voneinander. Wie weit auch immer diese beiden Systeme voneinander entfernt sind, der Spin-Zustand des Ganzen bleibt der Singulett-Zustand. Wenn eine Messung des Spin in einer gegebenen Richtung an dem einen System durchgeführt wird,

¹ Für Diskussionen zu diesem Thema danke ich Jürgen Audretsch, Thomas Breuer, Jeremy Butterfield, Steven French, Stephan Hartmann, Markus Knecht, Peter Mittelstaedt, Hans Primas, Michael Redhead, Paul Teller, Gereon Wolters und Christian Zengin. Ferner bin ich einem anonymen Gutachter für *Philosophia Naturalis* zu Dank verpflichtet für hilfreiche Kommentare.

dann wird nach herkömmlicher Auffassung der Singulett-Zustand (3) auf einen der beiden Produktzustände (1) oder (2) reduziert. Das bedeutet operationell: Wenn das Ergebnis einer Messung des Spin an dem einen System gegeben ist, dann können wir das Ergebnis einer Messung des Spin [160] in derselben Richtung an dem anderen System mit Sicherheit (Wahrscheinlichkeit eins) voraussagen. Wenn zwischen den Richtungen eine Differenz besteht, dann gibt es nichtsdestoweniger statistische Korrelationen: gegeben das Ergebnis der Messung an dem einen System ist die Wahrscheinlichkeit für das Ergebnis der Messung an dem anderen System verändert – die beiden Ergebnisse sind nicht mehr gleich wahrscheinlich, sondern das eine Ergebnis ist wahrscheinlicher als das andere. Nur wenn der Spin an beiden Systemen in orthogonale Richtungen gemessen wird, bestehen keine solchen Korrelationen mehr. In dem Experiment von Aspect et al., 1982, werden solche statistischen Korrelationen sogar zwischen den Ergebnissen von Messungen nachgewiesen, die raumartig voneinander getrennt sind. Inzwischen gibt es mehrere ähnliche Experimente (jüngst Tittel et al., noch nicht veröffentlicht). Das Theorem von Bell, 1964, impliziert, daß die Emission der beiden Systeme von der Quelle keine zureichende gemeinsame Ursache sein kann, durch die diese statistischen Korrelationen erklärt werden können.

Der Zustand eines Systems zu einem Zeitpunkt determiniert die Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Werte derjenigen Eigenschaften dieses Systems zu dem betreffenden Zeitpunkt, deren Werte sich in der Zeit ändern (wie zum Beispiel Ort, Impuls und Spin in einer gegebenen Richtung). Diese Eigenschaften können daher als *zustandsabhängige Eigenschaften* bezeichnet werden. Im Unterschied dazu sind Eigenschaften wie Masse und Ladung zustandsunabhängig; ihr Wert ändert sich nicht im Laufe der Existenz des Systems. Der Fachbegriff für Eigenschaften eines Systems ist „Observablen“. Der Begriff „Observable“ ist nicht an Messungen gebunden, obwohl diese Wortwahl einen solchen Eindruck nahelegen kann.

Seit Schrödinger, 1935, werden Fälle wie der Singulett-Zustand als *Zustandsverschränkungen* bezeichnet. Wie es philosophisch sinnvoll ist, begrifflich zwischen einem System und seinen Eigenschaften zu unterscheiden, so ist es auch philosophisch sinnvoll, zwischen einem System und seinem Zustand begrifflich zu unterscheiden. Deshalb ist es nicht angebracht, von der Verschränkung von zwei oder mehr physikalischen Systemen zu reden. Ich spreche daher von der Verschränkung der Zustände von zwei oder mehr physikalischen Systemen. Dabei sind die Zustände dieser Systeme in der Weise verschränkt, daß diese Systeme gar nicht je für sich einen Zustand im Sinne eines reinen Zustands haben. Nur das Ganze, das aus diesen Systemen besteht, ist in einem reinen Zustand. Nur [161] das Ganze kann folglich durch einen Zustandsvektor beschrieben werden.

Nichtsdestoweniger ist es im Formalismus der Quantentheorie möglich, von jedem der Systeme, die von einer Zustandsverschränkung betroffen sind, einzeln eine Beschreibung zu geben, nämlich durch eine Dichtematrix. Man kann so weit gehen, die Beschreibung durch eine Dichtematrix als eine Zustandsbeschreibung anzusehen. Dann muß man aber zurückgreifen auf das Konzept eines gemischten Zustands im Sinne dessen, was seit d’Espagnat, 1971, Kap. 6.3, begrifflich als uneigentliche Mischung (improper mixture) bezeichnet wird. Diese Bezeichnung ist irreführend: Gemeint ist überhaupt nicht eine Mischung. Die Bezeichnung „uneigentliche Mischung“ steht für eine Beschreibung, die alle diejenigen Informationen enthält, welche bei einer Betrachtung des betreffenden Systems für

sich genommen zugänglich sind. Diese Beschreibung enthält aber nicht die Korrelationen, die dieses System mit anderen Systemen zusammenbinden.

Im Falle des Singulett-Zustands zum Beispiel enthält die Beschreibung jedes der beiden Systeme in Begriffen eines gemischten Zustandes die Wahrscheinlichkeitsverteilung für jede lokale Spin-Observable dieses Systems. *Lokale Observablen* sind alle diejenigen Eigenschaften, die sich nur auf eines der beiden Systeme beziehen. Spin in z-Richtung des einen Systems und Spin in z-Richtung des anderen Systems sind Beispiele für lokale Observablen. Die Beschreibung jedes der beiden Systeme in Begriffen eines gemischten Zustandes enthält jedoch nicht die Korrelationen zwischen den lokalen Spin-Observablen beider Systeme. Diese Beschreibung enthält nicht die Information über die Änderung der Wahrscheinlichkeitsverteilungen lokaler Spin-Observablen des einen Systems infolge des Ergebnisses einer Messung des Spin des anderen Systems in einer gegebenen Richtung. Diese Beschreibung zeigt immer eine Wahrscheinlichkeit 0.5 für Spin plus und eine Wahrscheinlichkeit 0.5 für Spin minus in jeder Richtung für alle lokalen Spin-Observablen der beiden Systeme an. Die Beschreibung in Begriffen eines gemischten Zustands ist für beide Systeme identisch.

Wenn die Zustände zweier oder mehrerer Systeme verschränkt sind, dann kann jedes dieser Systeme einzeln also nur beschrieben werden in Begriffen eines gemischten Zustands im Sinne dessen, was „uneigentliche Mischung“ genannt wird; nur diese Systeme zusammengenommen sind in einem reinen Zustand. In bezug auf Zustandsverschränkungen kann [162] man aus folgendem Grund von Holismus sprechen: *Im Falle von Zustandsverschränkungen legt die Beschreibung, die jedem der betroffenen Systeme einzeln zugeordnet werden kann, die lokalen Eigenschaften dieses Systems nicht vollständig fest.* Denn diese Beschreibung enthält nicht die Veränderung der Wahrscheinlichkeitsverteilungen lokaler Eigenschaften dieses Systems infolge einer Messung an einem anderen System, auf das sich die Zustandsverschränkung erstreckt. Ferner determiniert diese Beschreibung nicht den Zustand des Ganzen, das aus diesen Systemen besteht. Es gibt Fälle, in denen zwei Systeme einzeln in denselben Begriffen gemischter Zustände beschrieben werden wie die beiden betrachteten Systeme, ohne zusammengenommen im Singulett-Zustand zu sein. Daraus folgt: *Im Falle von Zustandsverschränkungen legt nur die Beschreibung des Ganzen in Begriffen eines reinen Zustands – wie des Singulett-Zustands – die lokalen Eigenschaften der Teile und ihre Relationen vollständig fest* (in dem Maße wie diese Eigenschaften und Relationen in der Quantenphysik überhaupt festgelegt sind).

Der Singulett-Zustand ist kein Sonderfall. Ein ähnlicher Fall wird schon in einem berühmten Gedankenexperiment von Einstein, Podolsky und Rosen, 1935, entworfen: Einstein und seine Mitarbeiter betrachten zwei Systeme, die zusammen von einer Quelle emittiert werden, sich in eindimensionaler Bewegung befinden und deren Gesamtzustand eine Superposition von unendlich vielen Produktzuständen in bezug auf Ort oder Impuls der beiden Systeme ist. Keines der beiden Systeme ist in einem Zustand, in dem es einen definiten numerischen Wert des Ortes oder des Impulses hat. Wenn man eine Messung des Ortes oder des Impulses des einen Systems macht, dann kann man nach Einstein, Podolsky und Rosen das Ergebnis der Messung des Ortes beziehungsweise des Impulses des anderen Systems mit Sicherheit voraussagen (zu relativistischen Einschränkungen dieser Aussage siehe Smith und Weingard, 1987). Mehr noch, wann immer wir ein quantentheoretisches

Ganzes betrachten, das mehrere Quantensysteme als seine Teile hat, sagt uns die Quantentheorie, daß – abgesehen von extremen Ausnahmefällen – die Zustände dieser Quantensysteme miteinander verschränkt sind. Diese Überlegung trifft auch für das Ganze des physikalischen Bereichs auf der Ebene von Quantensystemen zu; strenggenommen ist nur für das Ganze aller Quantensysteme zusammengenommen die Annahme berechtigt, daß es in einem reinen Zustand ist (siehe zum Beispiel Scheibe, 1991, S. 228).

Wenn wir in bezug auf die Zustandsverschränkungen von Holismus [163] reden in dem Sinne, daß es einen Holismus im Gegenstandsbereich der Quantentheorie gibt, dann sehen wir eine Zustandsbeschreibung wie (3) nicht als einen Ausdruck der Beschränkung unseres Wissens an. Das heißt, wir halten es nicht für eine Beschränkung unseres Zugangs zu Quantensystemen, daß wir den Zustand der beiden Systeme zusammen nicht durch (1) oder (2) beschreiben können. Es ist vielmehr ein Zug der Realität, daß die Zustände der beiden Systeme miteinander verschränkt sind. Eine Beschreibung wie (3) referiert folglich auf den Zustand, in dem die beiden Systeme zusammengenommen vor einer Messung sind. Wenn wir von Holismus im Gegenstandsbereich der Quantentheorie reden, sind wir somit auf eine realistische Interpretation der Quantentheorie festgelegt: Die Quantentheorie sagt etwas darüber aus, wie die Natur unabhängig von Messungen beschaffen ist.

Umgekehrt ist jedoch nicht jede realistische Interpretation der Quantentheorie auf Holismus festgelegt. Wir können den Holismus vermeiden, indem wir eine Beschreibung wie (3) für unvollständig halten: es gibt in Wirklichkeit weitere, verborgene Parameter, die den Zustand der beiden Systeme determinieren. Infolge vor allem des Theorems von Bell, 1964, und der experimentellen Bestätigung der oben genannten Korrelationen durch raumartig voneinander getrennte Messungen ist jedoch der Preis sehr hoch, den wir für die Annahme solcher verborgener Parameter zahlen müßten (vergleiche zum Beispiel van Fraassen, 1991, Kap. 10). Ferner vermeidet man durch verborgene Parameter nicht unbedingt den Holismus. Der bekannteste und am besten ausgearbeitete Ansatz verborgener Parameter ist die Theorie von Bohm (letzte Fassung: Bohm und Hiley, 1993). Bohm spricht in bezug auf seine Theorie ebenfalls von Holismus; denn er nimmt ein Quantenpotential an, durch das räumlich getrennte Systeme unmittelbar zusammengebunden werden können. Ich kann hier nicht untersuchen, ob es sinnvoll ist, in bezug auf Bohms Theorie von Holismus zu sprechen. Ich gehe im folgenden von einer realistischen Interpretation der Quantentheorie ohne verborgene Parameter aus.

Um von Holismus im Gegenstandsbereich der Quantenphysik zu sprechen, sind wir nur an eine minimale Anforderung für eine realistische Interpretation der Quantentheorie gebunden. Wir brauchen uns also nicht auf eine bestimmte realistische Interpretation festzulegen. Insbesondere ist es nicht erforderlich, die Logik in irgendeiner Weise zu ändern. *Es ist eine minimale Anforderung für eine realistische Interpretation der Quantentheorie, Observable, von denen ein System in einem gegebenen [164] Zustand einen definiten numerischen Wert hat (so daß der Zustand des Systems als Eigenzustand dieser Observablen dargestellt werden kann), als Eigenschaften anzuerkennen, die dieses System objektiv in diesem Zustand hat.*

Was besagt diese Anforderung, wenn wir sie auf die erwähnten paradigmatischen Fälle von Zustandsverschränkungen anwenden? Betrachten wir noch einmal den Singulett-Zustand: Keines der beiden Systeme ist in einem Zustand von entweder Spin plus oder Spin minus in irgendeiner Richtung. Keines der beiden Systeme hat somit einen definiten numerischen Wert

einer lokalen Spin-Observablen. Der Singulett-Zustand ist aber Eigenzustand einer *globalen Spin-Observable*, das heißt, einer Observable des Gesamtsystems, nämlich des Gesamtspin:

$$(4) \quad S^2 = (S_{1x} + S_{2x})^2 + (S_{1y} + S_{2y})^2 + (S_{1z} + S_{2z})^2$$

In dieser Formel beziehen sich die Indizes 1 und 2 auf das erste beziehungsweise das zweite System, und die Indizes x , y und z beziehen sich auf den Spin in den drei orthogonalen Richtungen. Der Gesamtspin ist eine physikalisch signifikante Observable. Er hat im Singulett-Zustand den definiten numerischen Wert null.

Eine ähnliche Überlegung gilt für den Fall von Einstein, Podolsky und Rosen, 1935: Keines der beiden Systeme hat einen definiten numerischen Wert des Ortes oder des Impulses. Aber in dem reinen Zustand, in dem die beiden Systeme zusammengenommen sind, haben die folgenden beiden globalen Observablen einen definiten numerischen Wert: der relative Abstand $Q_1 - Q_2$ und der Gesamtimpuls $P_1 + P_2$. Der Wert des Abstands verändert sich deterministisch in der Zeit. Der Wert des Gesamtimpulses ist konstant null. Wenn wir die genannte minimale Anforderung für eine realistische Interpretation der Quantentheorie akzeptieren, dann müssen wir anerkennen, daß die beiden Systeme zusammengenommen Eigenschaften haben wie relativer Abstand, Gesamtimpuls oder Gesamtspin.²

Die genannten globalen Observablen werden als Kombinationen lokaler Observablen der Teile dargestellt. Diese globalen Eigenschaften zu haben, schließt Wahrscheinlichkeitsverteilungen für diese lokalen Observablen und Korrelationen zwischen den Wahrscheinlichkeitsverteilungen der lokalen Observablen beider Teile ein. Wenn wir eine realistische Interpretation der Quantentheorie akzeptieren, dann sind wir darauf festgelegt, die Wahrscheinlichkeiten in der Quantentheorie als objektive [165] Wahrscheinlichkeiten zu betrachten. Das heißt, diese Wahrscheinlichkeiten drücken keinen Wissensmangel unsererseits aus. Aber um für Holismus in der Quantenphysik zu argumentieren, müssen wir uns nicht auf eine bestimmte Konzeption objektiver Wahrscheinlichkeiten festlegen.

Man kann die genannten globalen Eigenschaften so ansehen, daß sie Dispositionen für die beiden Systeme einschließen, je einen definiten numerischen Wert von Ort, Impuls oder Spin in einer gegebenen Richtung zu erwerben; in diesem Fall interpretiert man die Wahrscheinlichkeitsverteilungen in der Quantentheorie so, daß sie in Propensitäten bestehen und die Stärke von Propensitäten anzeigen (siehe zum Beispiel Shimony, 1986). Man kann auch die Prämisse aufgeben, daß physikalische Eigenschaften einen definiten numerischen Wert haben und die Wahrscheinlichkeitsverteilungen mit Werten von Eigenschaften assoziieren, die eine Art objektiver Dispersion aufweisen (siehe zum Beispiel Bunge, 1985, Kap. 2, Sektionen 4 bis 6). Der Punkt, auf den es hier ankommt, ist lediglich: Wie auch immer man eine realistische Interpretation der Quantentheorie ohne verborgene Parameter ausbuchstabiert, im Falle der Zustandsverschränkungen gibt es globale Eigenschaften der

² In dem Fall, den Einstein, Podolsky und Rosen betrachten, kann die Beschreibung in Begriffen von sogenannten gemischten Zuständen, die von jedem der beiden Systeme einzeln gegeben werden kann und die identisch für die beiden Systeme ist, so angesehen werden, daß sie Informationen über den relativen Abstand enthält: die Wahrscheinlichkeitsverteilung der lokalen Observable des Ortes von jedem der beiden Systeme ist um zwei Spitzen konzentriert mit einem Abstand zwischen diesen beiden Spitzen. Aber diese Beschreibung enthält keine Informationen über die Korrelationen zwischen den lokalen Observablen des Ortes der beiden Systeme.

betroffenen Systeme zusammengenommen; es gibt jedoch keine lokalen Eigenschaften jedes dieser Systeme, die in der Beschreibung, die jedem dieser Systeme einzeln zugeordnet werden kann, erfaßt werden und durch die diese globalen Eigenschaften determiniert sind. Das ist der Kern des Holismus der Quantenphysik. Für diesen Kern benötigen wir nicht mehr als die genannte minimale Anforderung an eine realistische Interpretation der Quantentheorie. Für das folgende setze ich nur eine Festlegung auf diese minimale Anforderung voraus.

3. Was bedeutet der Holismus der Quantenphysik?

Es liegt nahe, den Holismus der Quantenphysik durch ein *Versagen von Supervenienz* zu beschreiben. Im Falle einer Zustandsverschränkung ist der Zustand des Gesamtsystems nicht durch die Beschreibungen in Begriffen eines gemischten Zustands determiniert, die den Teilen einzeln zugeordnet werden können. Das heißt: Der Zustand des Gesamtsystems ist nicht supervenient bezüglich dem, was in den Beschreibungen erfaßt wird, die den Teilen einzeln zugeordnet werden können. Teller, 1986, charakterisiert [166] die Zustandsverschränkungen in der Quantenphysik durch Relationen zwischen den Teilen eines Ganzen, die nicht supervenient sind bezüglich der nicht-relationalen Eigenschaften der Teile. Im Singulett-Zustand zu sein, ist Teller zufolge eine Relation zwischen zwei Systemen. Diese Relation ist nicht supervenient bezüglich der nicht-relationalen Eigenschaften dieser Systeme. Teller, 1986, spricht daher von relationalem Holismus.

Zustandsverschränkungen können als eine *nicht-superveniente Relation* zwischen zwei oder mehr Systemen angesehen werden. Jedes der beteiligten Systeme hat die relationale Eigenschaft, daß sein Zustand mit den Zuständen der anderen Systeme verschränkt ist, so daß nur das Ganze in einem reinen Zustand ist. Es gibt jedoch noch mehr nicht-superveniente Relationen als diejenigen, in denen die Zustandsverschränkungen der Quantenphysik bestehen. Räumliche und raum-zeitliche Relationen sind ebenfalls nicht-superveniente Relationen. Der räumliche oder raum-zeitliche Abstand zwischen zwei Systemen ist durch die nicht-relationalen Eigenschaften dieser Systeme nicht determiniert. Räumliche und raum-zeitliche Relationen sind jedoch kein Fall von Holismus.

Selbst wenn wir eine Ausnahme für raum-zeitliche Relationen machen, können wir uns weitere nicht-superveniente Relationen denken, die kein Kandidat für Holismus sind. Lewis, 1986, S. 77, fordert uns in einem anderen Zusammenhang zu einem Gedankenexperiment auf, in dem wir uns eine Welt vorstellen, in der die Eigenschaften „gleich geladen wie bestimmte andere Dinge zu sein“ und „entgegengesetzt geladen wie bestimmte andere Dinge zu sein“ irreduzibel relational sind. Diese Eigenschaften sind in dieser Welt also nicht durch die nicht-relationalen Eigenschaften „positiv geladen zu sein“ und „negativ geladen zu sein“ determiniert; diese Eigenschaften gibt es in dieser Welt nicht. Wir haben in dieser möglichen Welt mithin nicht-superveniente Ladungs-Relationen. Aber trotzdem gibt es in dieser Welt nichts der gleichen wie die Zustandsverschränkungen der Quantenphysik. Ich behaupte daher: *Nicht-superveniente Relationen über die raum-zeitlichen Relationen hinaus sind eine notwendige Bedingung für die quantentheoretischen Zustandsverschränkungen; aber es handelt sich hierbei nicht um eine hinreichende Bedingung.* (Teller stimmt dieser Behauptung im Gespräch zu.) *Wir benötigen eine Unterscheidung innerhalb nicht-supervenienter Relationen, die das herausgreift, was für die Zustandsverschränkungen in der Quantenphysik spezifisch ist.*

[167] Wie können wir eine solche Unterscheidung erreichen? Beachten wir den folgenden Punkt: Es ist nicht spezifisch genug, von zwei Systemen zu sagen, daß ihre Zustände miteinander verschränkt sind oder daß sie durch eine Relation der Verschränkung miteinander verbunden sind. Die Frage ist: In bezug auf welche Eigenschaften sind diese Systeme miteinander verschränkt? Der Singulett-Zustand ist ein Beispiel für Verschränkung in bezug auf Spin; der Zustand, den Einstein, Podolsky und Rosen betrachten, ist ein Beispiel für Verschränkung in bezug auf Ort und Impuls. Konzentrieren wir uns deshalb auf die Eigenschaften, die von der Verschränkung betroffen sind.

Es gibt in der Literatur einen weiteren ausgearbeiteten Vorschlag für eine Charakterisierung des Quanten-Holismus durch ein Versagen von Supervenienz. Ausgehend von den Zustandsverschränkungen in der Quantenphysik entwickelt Healey, 1991, das folgende Konzept von Holismus in der Physik: Ein physikalisches Ganzes im Sinne eines holistischen Systems hat signifikante intrinsische Eigenschaften, die seine Teile nicht haben und die nicht supervenient sind bezüglich der qualitativen, intrinsischen Eigenschaften der Teile und einiger ihrer Relationen wie ihrer räumlichen Relationen. Das besagt: Die qualitativen, intrinsischen Eigenschaften der Teile und ihre räumlichen Relationen determinieren nicht die Eigenschaften des Ganzen. Healey bezieht seine Charakterisierung eines holistischen Systems auf die paradigmatischen Fälle des Singulett-Zustands und des Zustands, den Einstein, Podolsky und Rosen betrachten.³

Der Vorschlag von Healey bringt ein wichtiges Merkmal des Holismus der Quantenphysik auf den Punkt: Wenn die Zustände zweier oder mehrerer Quantensysteme miteinander verschränkt sind, dann hat das Ganze, das aus diesen Systemen besteht, physikalisch signifikante Eigenschaften, die nicht supervenient sind bezüglich der nicht-relationalen Eigenschaften der Teile. Der Holismus der Quantenphysik ist deshalb so erstaunlich, weil wir erwarten, daß in den dargestellten paradigmatischen Fällen Eigenschaften des Ganzen wie relativer Abstand, Gesamtimpuls oder Gesamtspin durch die Eigenschaften der Teile determiniert sind. Dann stellt es sich jedoch heraus, daß die Teile keine Eigenschaften haben, welche diese Eigenschaften des Ganzen determinieren. Healey konzipiert diese Eigenschaften des Ganzen als emergente Eigenschaften in folgendem Sinne: Es handelt sich um nicht-relationale Eigenschaften des Ganzen, die (a) der Art nach verschieden sind von den Eigenschaften der Teile und die (b) [168] nicht reduzierbar sind auf die Eigenschaften der Teile; die genannten Eigenschaften sind ja nicht einmal supervenient bezüglich der Eigenschaften der Teile.

In dieser Erklärung der Eigenschaften eines quantentheoretischen Ganzen folge ich Healey nicht. Ich sehe keinen überzeugenden Grund dafür, infolge des Quanten-Holismus emergente Eigenschaften im genannten Sinne anzuerkennen. Meines Erachtens liegen im Falle von Zustandsverschränkungen keine Eigenschaften des Ganzen vor, die der Art nach verschieden sind von den Eigenschaften der Teile. In den paradigmatischen Fällen von Zustandsverschränkungen sind Eigenschaften wie relativer Abstand, Gesamtimpuls oder Gesamtspin zwar globale Observablen, die sich auf das Ganze beziehen. Im Formalismus der

³ Zur Kritik an Healey vergleiche Robinson, 1992. Liu, 1996, geht so weit, die Korrelationen zwischen den Meßergebnissen in die Supervenienz-Basis aufzunehmen. Dann argumentiert er gegen Holismus in der Quantenphysik auf der Grundlage von Healeys Vorschlag. Siehe insbesondere S. 277.

Quantentheorie werden diese Eigenschaften aber als eine Kombination lokaler Observablen dargestellt, die sich auf die Teile beziehen. Man kann daher argumentieren, daß relativer Abstand, Gesamtimpuls oder Gesamtspin Eigenschaften der Art Ort, Impuls oder Spin sind.

Mehr noch, die genannten Eigenschaften des Gesamtsystems sind nur signifikant, insofern sie etwas über die Teile aussagen. Relativer Abstand gibt an, wie die Teile in bezug auf den Ort miteinander verbunden sind, obwohl keines der beiden Teile einen definiten numerischen Wert des Ortes hat. (Healey, 1991, S. 418–419, bestreitet allerdings, daß es in dem Fall, den Einstein, Podolsky und Rosen betrachteten, einen definiten numerischen Wert des Abstands gibt). Der Wert null des Gesamtimpulses zeigt an, wie die Teile in bezug auf den Impuls miteinander verbunden sind, obwohl keines der beiden Teile einen definiten numerischen Wert des Impulses hat. Das gleiche gilt für den Wert null des Gesamtspin: diese globale Observable zeigt die Weise an, in der die lokalen Spin-Observablen der Teile miteinander verbunden sind, obwohl keines der Teile einen definiten numerischen Wert des Spin in irgendeiner Richtung hat.

Im Falle der Zustandsverschränkungen haben wir es daher meines Erachtens zu tun mit *Eigenschaften des Ganzen, die nicht supervenient sind bezüglich der nicht-relationalen Eigenschaften, welche jedes der Teile hat, die aber die Weise anzeigen, in der die Teile in bezug auf einige ihrer lokalen Eigenschaften miteinander verbunden sind*. Verfolgen wir diesen Punkt weiter, um ihn zu einer Charakterisierung des Quanten-Holismus auszuarbeiten, welche diesen Holismus abhebt von anderen Fällen nicht-supervenienter Eigenschaften eines Ganzen und nicht-supervenienter Relationen zwischen Teilen.

[169] Es gibt in der Literatur einen dritten ausgearbeiteten Vorschlag für eine Charakterisierung des Quanten-Holismus. Howard, 1989 und 1997, arbeitet nicht mit dem Konzept eines Versagens von Supervenienz, sondern mit dem Konzept eines Versagens von Separabilität. Er charakterisiert das Prinzip der Separabilität als die Behauptung, daß (1) räumlich voneinander getrennte Systeme je einen eigenen, distinkten Zustand besitzen und daß (2) der Zustand eines Gesamtsystems, das aus zwei oder mehr Systemen besteht, vollständig determiniert ist durch die Zustände seiner Teile. Howard spricht daher von Nichtseparabilität in bezug auf die Zustandsverschränkungen in der Quantenphysik.⁴ Er sieht Nichtseparabilität als hinreichend dafür an, von ontologischem Holismus zu reden. Ferner denkt er Separabilität als das Prinzip der Individuation physikalischer Systeme. Howard legt dementsprechend nahe, daß es sich im Falle von Zustandsverschränkungen gar nicht um zwei oder mehr physikalische Systeme handelt, sondern nur um ein ganzheitliches System.

Meines Erachtens enthält Howards Vorschlag zwei wichtige Gedanken für eine philosophische Charakterisierung des Quanten-Holismus: (a) *Der Holismus der Quantenphysik besteht in der Nichtseparabilität der Zustände zweier oder mehrerer physikalischer Systeme*. (b) *Die Nichtseparabilität macht es zumindest fragwürdig, ob überhaupt mehrere physikalische Systeme im Sinne mehrerer Individuen vorliegen*.

Wir können jedoch nicht dabei stehenbleiben, lediglich von einem ganzheitlichen System zu sprechen. Es mag zwar nur ein Individuum vorliegen. Dieses Ganze hat aber eine innere Struktur; diese innere Struktur ist gerade dasjenige, was es als ein ganzheitliches System

⁴ Healey, 1991, gebraucht den Begriff „Nichtseparabilität“ in einem anderen Sinne: Er spricht von nichtseparablen Prozessen.

kennzeichnet. Ein quantentheoretisches Ganzes hat Teile, auch wenn diese Teile vielleicht keine Individuen sind. Von Zustandsverschränkungen zu sprechen, macht nur Sinn, wenn es mindestens zwei Teile gibt, deren Zustände miteinander verschränkt sind. Von einem Fall von Holismus oder Nichtseparabilität können wir dann und nur dann reden, wenn wir einen Zustand nur als eine Superposition von Produktzuständen darstellen können; das setzt voraus, daß wir auf mindestens zwei Teile referieren. Wenn es also einen Fall von Quanten-Holismus gibt, dann gibt es mindestens zwei Teile eines quantentheoretischen Ganzen.

Ferner, welche Erklärung man auch immer für die Korrelationen zwischen den Meßergebnissen in einem Experiment wie dem von Aspect et al., 1982, für plausibel hält, es besteht kein Grund, wegen dieser Korrelationen von folgender Annahme abzurücken: in diesem Experiment wird [170] jeweils ein Photonenpaar erzeugt; die beiden Photonen entfernen sich nach der Emission in entgegengesetzte Richtungen voneinander; folglich gibt es dann, wenn die Messung stattfindet, keine nennenswerte Interaktion zwischen diesen Photonen mehr.

Ich werde auf die Teile eines quantentheoretischen Ganzen weiterhin als physikalische Systeme referieren; ich bitte, diese Rede von physikalischen Systemen so zu verstehen, daß offenbleibt, ob es sich dabei um Individuen handelt. Gemäß der Terminologie, die ich gebrauche, ist es notwendig und hinreichend für etwas, ein physikalisches System zu sein, daß physikalische Eigenschaften von ihm ausgesagt werden können. Von jedem der beiden Photonen in einem Bell-Experiment kann man beispielsweise die physikalische Eigenschaft aussagen, in bezug auf den Spin mit einem anderen Photon verschränkt zu sein. Ob aber alles, von dem physikalische Eigenschaften ausgesagt werden können, ein Individuum ist, ist eine andere Frage. Ich verfolge zunächst den Gedanken von Nichtseparabilität weiter und komme dann auf die Frage nach Individuen zurück.

Wenn wir das Versagen von Separabilität für eine philosophische Charakterisierung der Zustandsverschränkungen in der Quantentheorie einsetzen wollen, dann ist es sinnvoll, Howards Bedingung einer räumlichen Trennung der betroffenen Systeme fallenzulassen. Es gibt Fälle von Zustandsverschränkungen, in denen von einer räumlichen Trennung der betroffenen Systeme keine Rede sein kann. Zum Beispiel ist der Gesamtspinzustand der beiden Elektronen eines Heliumatoms im Grundzustand ebenfalls der Singulett-Zustand, und diese Elektronen sind nicht räumlich voneinander getrennt.

Ich schlage daher die folgende Charakterisierung von *Separabilität* vor: *Jedes physikalische System hat einen Zustand in dem Sinne, daß (1) dieser Zustand die zustandsabhängigen, lokalen Eigenschaften dieses Systems vollständig festlegt und (2) der Gesamtzustand von zwei oder mehr Systemen supervenient ist bezüglich der Zustände, die jedes dieser Systeme hat.* Dieser Vorschlag legt die folgende Charakterisierung von Nichtseparabilität nahe: *Die Zustände zweier oder mehrerer Systeme sind dann und nur dann nichtseparabel, wenn lediglich der Gesamtzustand dieser Systeme zusammengenommen die zustandsabhängigen, lokalen Eigenschaften jedes dieser Systeme und die Relationen zwischen diesen Systemen vollständig festlegt* (in dem Maße, wie diese Eigenschaften und Relationen überhaupt festgelegt sind). Jeder Fall von Zustandsverschränkungen ist demzufolge ein Fall von Nichtseparabilität: Lediglich der reine Zustand der [171] betroffenen Systeme zusammengenommen legt die lokalen Eigenschaften jedes dieser Systeme und ihre Korrelationen vollständig fest.

Dieser Vorschlag für eine Charakterisierung von Nichtseparabilität impliziert ein Versagen von Supervenienz. Präziser gesprochen, dieser Vorschlag impliziert, daß es Relationen zwischen den betroffenen Systemen gibt, die nicht supervenient sind bezüglich der Eigenschaften der betroffenen Systeme, wie diese Eigenschaften erfaßt werden in der Beschreibung, die jedem dieser Systeme einzeln zugeordnet werden kann. Wenn wir ferner die Beschreibung des Gesamtzustands dieser Systeme zusammengenommen so verstehen, daß dem Ganzen Eigenschaften zugeschrieben werden, dann hat das Ganze Eigenschaften, die nicht supervenient sind bezüglich der Eigenschaften der Teile, wie diese Eigenschaften der Teile erfaßt werden in der Beschreibung, die jedem der Teile einzeln zugeordnet werden kann. Von Nichtseparabilität zu sprechen, kann jedoch mehr aussagen als diese Vorschläge in Begriffen eines Versagens von Supervenienz.

Für jedes System einer bestimmten qualitativen Art gibt es eine Familie von Eigenschaften, die etwas zu einem System der betreffenden Art machen. Eine solche Familie kann sowohl nicht-relationale als auch relationale Eigenschaften umfassen. Etwas ist ein System einer bestimmten Art dann und nur dann, wenn es alle – oder den weit überwiegenden Teil – der Eigenschaften der betreffenden Familie von Eigenschaften hat. Etwas ist ein Sandkorn beispielsweise dann und nur dann, wenn es eine bestimmte molekulare Struktur und eine Größe, Gestalt und Masse innerhalb bestimmter Bandbreiten hat. Solches gehört zu der Familie von Eigenschaften, die etwas zu einem Sandkorn machen. (Diese Konzeption und ihre Relevanz für eine Begriffsbestimmung von Holismus arbeite ich aus in Esfeld, 1998).

Was ist die Familie von Eigenschaften, die allen Arten von Quantensystemen gemeinsam sind und die daher etwas zu einem Quantensystem machen? Zustandsabhängige Eigenschaften wie Ort, Impuls und Spin in jeder der drei Raumrichtungen zählen ebenso wie Masse und Ladung zu der Familie von Eigenschaften, die etwas zu einem Quantensystem machen. Wenn etwas ein Quantensystem ist, dann ist es sinnvoll, nach Ort, Impuls oder Spin in einer gegebenen Richtung zu fragen, ebenso wie nach Masse oder Ladung. Die letzteren, zustandsunabhängigen Eigenschaften sind hinreichend, um eine Art von Quantensystemen von anderen Arten von Quantensystemen zu unterscheiden. Aber diese Eigenschaften sind [172] nicht hinreichend, um etwas zu einem Quantensystem zu machen. Eigenschaften wie Masse oder Ladung zu haben, ist daran gebunden, raum–zeitlich zu sein. Nur etwas, das raum–zeitlich ist, kann solche Eigenschaften haben. Nichts, das nicht in irgendeinem Sinne Ort, Impuls und Spin in einer gegebenen Richtung hat, ist daher ein quantenphysikalisches System.

Wenn jedoch der Zustand eines Quantensystems mit dem Zustand eines anderen Quantensystems verschränkt ist, wie in den paradigmatischen Fällen von Einstein, Podolsky und Rosen sowie dem Singulett-Zustand, dann haben diese Systeme nicht je separat einen Ort, einen Impuls oder einen Spin in einer gegebenen Richtung. Nichtsdestoweniger haben diese Systeme zusammengenommen Eigenschaften wie in den paradigmatischen Fällen relativer Abstand, Gesamtimpuls oder Gesamtspin. Wenn jemand nach Ort, Impuls oder Spin in einer gegebenen Richtung eines dieser Systeme fragt, dann können wir diese Frage folgendermaßen beantworten: Ein System ist mit einem anderen System in einer solchen Weise verbunden, daß nur die beiden Systeme zusammengenommen die Eigenschaften Ort, Impuls oder Spin im Sinne von relativem Abstand mit definitivem numerischen Wert, Gesamtimpuls null oder Gesamtspin null haben. Die Eigenschaft relativer Abstand des

Ganzen zeigt jedoch die Weise an, in der die Teile in bezug auf den Ort miteinander verbunden sind; und die Eigenschaft Gesamtimpuls des Ganzen zeigt die Weise an, in der die Teile in bezug auf den Impuls miteinander verbunden sind. Ebenso zeigt die Eigenschaft Gesamtspin des Ganzen die Weise an, in der die Teile in bezug auf den Spin in jeder Raumrichtung miteinander verbunden sind. Denn diese Eigenschaften des Ganzen schließen die Korrelationen zwischen den Wahrscheinlichkeitsverteilungen der lokalen Observablen von Ort, Impuls und Spin in jeder Raumrichtung jedes der beiden Systeme ein ebenso wie die Veränderung der Wahrscheinlichkeitsverteilungen lokaler Observablen des einen Systems infolge einer Messung des anderen Systems.

Wenn wir diese Überlegung hinzuziehen, dann können wir die Charakterisierung dessen zuspitzen, was Zustandsverschränkungen von anderen nicht-supervenienten Relationen oder nicht-supervenienten Eigenschaften eines Ganzen unterscheidet. Wir können das berücksichtigen, was die Zustandsverschränkungen so verblüffend macht: wir erwarten von den angegebenen globalen Eigenschaften, daß sie durch Eigenschaften determiniert sind, die den Teilen je separat zukommen; es fehlen jedoch entsprechende [173] separate Eigenschaften der Teile. Die nicht-supervenienten Relationen der Zustandsverschränkung und die nicht-supervenienten Eigenschaften eines quantentheoretischen Ganzen bestehen in Nichtseparabilität in folgendem Sinne des Fehlens separater Eigenschaften der Teile: *Im Falle von Zustandsverschränkungen haben die Teile einige der Eigenschaften, die zu der Familie von Eigenschaften gehören, die etwas zu einem Quantensystem machen, nur zusammengenommen – in dem Sinne, daß die resultierenden Eigenschaften des Ganzen die Weise anzeigen, in der die Teile miteinander verbunden sind in bezug auf Eigenschaften wie Ort, Impuls und Spin in jeder Raumrichtung.*

Kommen wir nun kurz zu der Frage zurück, ob Quantensysteme Individuen sind. Wenn die Zustände von zwei oder mehr Quantensystemen derselben Art miteinander verschränkt sind, dann – und nur dann – sind diese Systeme ununterscheidbar in dem Sinne, daß jedes Prädikat, das auf eines dieser Systeme zutrifft, auch auf alle anderen dieser Systeme zutrifft (siehe French und Redhead, 1988). Quantensysteme erfüllen folglich nicht die üblichen Identitätsbedingungen für Individuen. Man kann deshalb argumentieren, daß Quantensysteme keine Individuen sind (French und Krause, 1995; Lowe, im Erscheinen).

Mein Vorschlag zeigt einen begrifflichen Zusammenhang zwischen der Ununterscheidbarkeit von Quantensystemen und den Zustandsverschränkungen: Wenn ein Quantensystem einige der Eigenschaften, die etwas zu einem Quantensystem machen, nur zusammengenommen mit anderen Quantensystemen hat, dann kann es sich nicht durch diese Eigenschaften von diesen anderen Systemen unterscheiden. Die Zustandsverschränkungen können alle zustandsabhängigen Eigenschaften betreffen; und wenn wir Quantensysteme der gleichen Art betrachten, sind diese Systeme auch nicht durch ihre zustandsunabhängigen Eigenschaften unterschieden. Mein Vorschlag erklärt jedoch die Fälle von Ununterscheidbarkeit von Quantensystemen, ohne darauf festgelegt zu sein, Quantensysteme entweder als Individuen zu betrachten oder sie nicht als Individuen zu betrachten. Wenn Quantensysteme einige der Eigenschaften, die etwas zu einem Quantensystem machen, nur zusammengenommen haben, dann kann man vertreten, daß höchstens diese Systeme zusammengenommen ein Individuum sind. Man kann jedoch auch die interne Struktur eines

quantentheoretischen Ganzen, das aus mindestens zwei Quantensystemen mit verschränkten Zuständen besteht, als hinreichend [174] dafür ansehen, daß diese Systeme Individuen sind: es gibt eine definite Anzahl von Quantensystemen, obwohl diese Systeme nicht durch die Zuschreibung von Eigenschaften voneinander unterschieden werden können. Das heißt: Man kann die definite Anzahl als hinreichend für Individualität ansehen, ohne Unterscheidbarkeit zu fordern.

Um zusammenzufassen, mein Vorschlag zur Charakterisierung des Holismus der Quantenphysik besteht in drei Stufen, welche die drei ausgearbeiteten Vorschläge, die es in der Literatur gibt, zusammenführen:

- 1) Die Zustandsverschränkungen besagen, daß es nicht-superveniente Relationen über die raum-zeitlichen Relationen hinaus gibt.
- 2) Die nicht-supervenienten Relationen von Verschränkung zwischen den Teilen eines quantentheoretischen Ganzen bedeuten, daß das Ganze Eigenschaften hat, die nicht supervenient sind bezüglich der lokalen Eigenschaften der Teile, die aber anzeigen, wie die Teile in bezug auf deren lokale Eigenschaften miteinander verbunden sind.
- 3) Die Zustandsverschränkungen sind deshalb verblüffend, weil diese Eigenschaften des Ganzen darauf hinauslaufen, daß die Quantensysteme, die seine Teile sind, einige der Eigenschaften, die etwas zu einem Quantensystem machen, nicht separat, sondern nur zusammengenommen haben – in dem Sinne, daß die resultierenden Eigenschaften des Ganzen die Weise anzeigen, in der die Teile miteinander verbunden sind in bezug auf Eigenschaften wie Ort, Impuls und Spin.

4. Was sind die Grenzen des Holismus der Quantenphysik?

Wie die Ausführungen in der vorangehenden Sektion zeigen, erfordert die Quantenphysik tiefgreifende Änderungen unserer Sicht zumindest des mikrophysikalischen Bereichs im Vergleich zu dem, was in der Philosophie der klassischen Physik vertreten wurde (ich gehe darauf näher ein in Esfeld, im Erscheinen): Quantensysteme haben Eigenschaften wie Ort, Impuls und Spin in jeder Raumrichtung in der Regel nicht je separat, und sie sind infolgedessen keine distinkten Individuen. Im möchte nun auf die Grenzen des Holismus der Quantenphysik eingehen. Betrifft dieser Holismus nur mehr oder weniger den mikrophysikalischen Bereich? Oder dehnt dieser Holismus sich von dem mikrophysikalischen Bereich her aus bis hin zu makroskopischen Systemen und Alltagsgegenständen wie Meßgeräten, Bäumen und Katzen?

Der Vorschlag, daß selbst makroskopische Systeme Zustandsverschränkungen [175] unterworfen sind, mag absurd erscheinen. Dieser Vorschlag kann jedoch nicht einfach abgewiesen werden. Der Grund ist das Meßproblem in der Quantentheorie. Es gibt keine offensichtliche Grenze für die Anwendbarkeit des Formalismus der Quantentheorie einschließlich des Superpositions-Prinzips und der Dynamik, die mit der Schrödingergleichung gegeben ist und die zu immer mehr Zustandsverschränkungen führt. Die berühmten Beispiele der Kette von von Neumann, 1932, Kap. VI, und der Katze von Schrödinger, 1935, S. 812, zeigen das in drastischer Weise: In diesen Beispielen setzen sich Zustandsverschränkungen fort von einem Quantensystem über makroskopische Geräte bis hin zu dem Körper eines Beobachters oder einer Katze, die dann in einer Superposition von lebendig und tot zu sein endet.

Das Meßproblem kann als die Frage gefaßt werden, wie man die folgenden beiden Behauptungen einander anpassen soll: (a) Messungen führen zu einem definiten Ergebnis. Beispielsweise ist ein Meßgerät nach der Messung des Spin eines Elektrons in einem solchen Zustand, daß es entweder plus oder minus anzeigt. (b) Wenn wir den Formalismus der Quantentheorie einschließlich der Schrödinger-Dynamik auf eine Meßsituation anwenden, enden wir mit einer Beschreibung, gemäß der die Zustände aller beteiligten Systeme verschränkt sind. Folglich ist keines der Systeme einschließlich des Meßgerätes in einem Zustand, in dem es einen definiten numerischen Wert irgendeiner der betrachteten Eigenschaften hat. (Zum Stand der Forschung zum Meßproblem siehe Busch et al., 1996, und Mittelstaedt, 1998).

Seit den klassischen Formulierungen des Meßproblems durch von Neumann und Schrödinger hat es bedeutende Fortschritte in der physikalischen Theoriebildung gegeben, insbesondere Dekohärenz-Theorien (für einen Überblick und eine Einschätzung siehe Giulini et al., 1996). Dekohärenz-Theorien zeigen das folgende: obwohl nur das Ganze von Quantensystem, Umgebung und Meßgerät in einem reinen Zustand ist, kann jeder Teil dieses Ganzen in Begriffen einer uneigentlichen Mischung beschrieben werden. Der Punkt ist: dieses Ganze entwickelt sich sehr schnell in einer solchen Weise, daß es operationell nicht von einer eigentlichen Mischung (proper mixture) unterschieden werden kann. Eine eigentliche Mischung ist ein Ensemble von Systemen, von denen jedes in einem reinen Zustand ist, der Beobachter den reinen Zustand des einzelnen Systems aber nicht kennt (zu dieser Terminologie siehe d'Espagnat, 1971, Kap. 6.3). Da jedoch Dekohärenz nur zu einer uneigentlichen Mischung [176] führt, die operationell nicht von einer eigentlichen Mischung unterschieden werden kann, lassen die heute verfügbaren Dekohärenz-Theorien die entscheidende Frage offen: Sollen wir eine Ontologie akzeptieren, die den Quanten-Holismus als universell im physikalischen Bereich ansieht und Dekohärenz-Theorien als ein Mittel begrüßen, um zu erklären, wie es kommt, daß die Welt Beobachtern klassisch *erscheint*? Oder sollen wir über die heute verfügbaren Dekohärenz-Theorien hinausgehen und annehmen, daß es Zustandsreduktionen gibt, durch die verschränkte Zustände auf Produktzustände reduziert werden, um die *Existenz* eines klassischen Bereichs der Welt zu erklären? Wir sind daher immer noch mit zwei grundlegenden Optionen in bezug auf das Meßproblem und die Reichweite des Quanten-Holismus konfrontiert:

(1) Einerseits kann man den Quanten-Holismus so ansehen, daß er sich infolge der Schrödinger-Dynamik auf alle physikalischen Systeme erstreckt. Ich bezeichne diese Position als die *Option für universellen Quanten-Holismus*: Die physikalische Welt ist ein großes Quantensystem. Nur für dieses System ist die Annahme berechtigt, daß es in einem reinen Zustand ist. Was auch immer für Teile dieses Systems es geben mag, jedes dieser Teile hat in Wirklichkeit einen Zustand, der mit den Zuständen vieler anderer Teile verschränkt ist. Es gibt keine Zustandsreduktionen. Es erscheint uns lediglich so, daß makroskopische Objekte einschließlich Alltagsgegenständen immer definite numerische Werte aller ihrer Eigenschaften haben und nicht Verschränkungen unterworfen sind. Wieso dieses uns so erscheint, dafür werden in der Literatur in erster Linie folgende Vorschläge vertreten: (a) Der Beobachter abstrahiert von Zustandsverschränkungen, die es in Wirklichkeit gibt, weil ihm nur eine Untermenge der Eigenschaften physikalischer Systeme zugänglich ist (siehe zum Beispiel Landsman, 1995). (b) Der Beobachter grenzt physikalische Systeme ab durch

Schnitte, mittels derer er von objektiv bestehenden Zustandsverschränkungen abstrahiert (siehe Primas, 1993). (c) Jeder Beobachter hat in Wirklichkeit mehrere, ja unendliche viele Bewußtseine (many minds) im Sinne mehrerer gleichzeitiger, inkompatibler, aber nicht miteinander interferierender Erfahrungen, von denen mindestens je eine einem Element in einer Superposition korrespondiert (siehe vor allem Albert und Loewer, 1988, und Lockwood, 1989, Kap. 12–13).

(2) Andererseits kann man vertreten, daß der Quanten-Holismus mehr oder weniger auf mikrophysikalische Systeme begrenzt ist. Ich bezeichne diese Position als die *Option für begrenzten Quanten-Holismus*. Dieser [177] Option zufolge gibt es Interaktionen, durch die Zustandsreduktionen stattfinden und somit Zustandsverschränkungen gestoppt werden. Messungen gehören zu diesen Interaktionen. Da die gegenwärtigen Dekohärenz-Theorien nicht hinreichen, um Ereignisse von Zustandsreduktionen zu erklären, ist es dann, wenn man diese Option vertritt, sinnvoll, eine Modifikation der Schrödinger-Dynamik ins Auge zu fassen. Das Ziel ist, eine generelle Dynamik zu formulieren, welche die Dynamik von Zustandsreduktionen einschließt. Es gibt im wesentlichen zwei Arten entsprechender Vorschläge: (a) Vorschläge innerhalb der Reichweite der gegenwärtigen Quantentheorie. Der am weitesten ausgearbeitete dieser Vorschläge stammt von Ghirardi, Rimini und Weber, 1986. (b) Vorschläge, die weitere Faktoren hinzuziehen, namentlich die Gravitation. Der prominenteste Advokat dieses Ansatzes ist Penrose, 1994, Kap. 6, §§10–12. Keiner dieser Vorschläge hat sich bisher jedoch als durchweg überzeugend herausgestellt.

Weil uns kein vollständig überzeugender *physikalischer* Vorschlag für eine Dynamik von Zustandsreduktionen zur Verfügung steht, ist es immer noch ein Gegenstand *philosophischer* Debatte, welche dieser beiden grundlegenden Optionen die plausiblere ist. Wenn es eine Frage in der Interpretation physikalischer Theorien gibt, die nicht durch Verweis auf den Forschungsstand der Physik entschieden werden kann, dann ist es sinnvoll, weitergehende philosophische Erwägungen hinzuzuziehen. In diesem Sinne möchte ich nun zu der Frage nach den Grenzen des Quanten-Holismus Stellung nehmen, indem ich auf Konsequenzen der beiden genannten grundlegenden Optionen für unser System des Wissens insgesamt eingehe.

Wenn wir die Option für universellen Quanten-Holismus für plausibel halten, dann behaupten wir, daß biologische Systeme, makroskopische Objekte und Alltagsgegenstände in Wirklichkeit Zustände haben, die mit den Zuständen vieler anderer Systeme verschränkt sind. Diese Behauptung hat die folgende Konsequenz: Die Theorien der Chemie, Biologie, Physiologie etc. und unserer Alltagsrealismus beschreiben physikalische Dinge nicht so, wie sie wirklich sind; denn nichts der gleichen wie Zustandsverschränkungen wird in diesen Theorien anerkannt. In Begriffen der Quantentheorie gesprochen setzen diese Theorien voraus, daß Zustandsreduktionen im Übergang zu makroskopischen Systemen stattfinden.

Der Punkt ist nicht einfach, daß gemäß der Option für universellen Quanten-Holismus makroskopische Systeme viel mehr Zustände haben [178] können, als im Alltagsrealismus oder irgendeiner Theorie der Chemie, Biologie, Physiologie etc. in Rechnung gestellt wird. Der Punkt ist vielmehr, daß gemäß dem universellen Quanten-Holismus makroskopische Systeme nahezu immer wie Schrödingers Katze in Wirklichkeit in Zuständen sind, die völlig verschieden sind von dem, was wir im Alltagsrealismus und in unseren wissenschaftlichen Theorien makroskopischer Systeme über diese Objekte annehmen. Diese Theorien und der Alltagsrealismus enthalten eine Ontologie, welche besagt, daß diese Systeme immer definite

Werte aller ihrer Eigenschaften haben (auch wenn insbesondere viele Alltagsprädikate vage sein mögen). Wenn man hingegen den Quanten-Holismus für universell hält, dann ist man auf eine Ontologie festgelegt, gemäß der diese Systeme nicht einen definiten Wert aller ihrer Eigenschaften zusammen haben können und in der Regel nicht einmal einen definiten Wert einer relevanten Auswahl ihrer Eigenschaften haben. Wenn man der Option für universellen Quanten-Holismus zustimmt, dann kann man die wissenschaftlichen Theorien makroskopischer Systeme einschließlich unseres Alltagsrealismus so ansehen, daß sie korrekt die Weise beschreiben, wie uns makroskopische Systeme erscheinen. Der Punkt aber ist: Man kann nicht der Option für universellen Quanten-Holismus zustimmen und die ontologischen Annahmen anerkennen, welche die Theorien makroskopischer Systeme einschließlich unseres Alltagsrealismus enthalten.

Wenn man hingegen die Option für begrenzten Quanten-Holismus für plausibel hält, dann kann man die Ontologie der Quantenphysik so ansehen, daß sie kompatibel ist mit den ontologischen Annahmen unserer Theorien makroskopischer Systeme einschließlich unseres Alltagsrealismus. Denn wenn man Zustandsreduktionen anerkennt, vertritt man ja, daß es einen Übergang von Quantensystemen zu makroskopischen Systeme gibt, welche nicht Zustandsverschränkungen unterworfen sind. Nichts hindert daher, daß unsere wissenschaftlichen Theorien und unserer Alltagsrealismus diese Systeme so beschreiben, wie sie tatsächlich sind.

Es mag möglich sein, auf der Grundlage der Option für universellen Quanten-Holismus ein kohärentes System des Wissens aufzubauen. Der Preis dafür ist jedoch hoch: Wir könnten die Quantentheorie nicht in unser bestehendes System des Wissens integrieren, sondern müßten umgekehrt unsere wissenschaftlichen Theorien makroskopischer Systeme und unseren Alltagsrealismus der Quantentheorie anpassen. Es ist sinnvoll, aus der Quantentheorie ontologische Konsequenzen für unser Verständnis [179] des mikrophysikalischen Bereichs zu ziehen; und, wie der Holismus der Quantenphysik zeigt, erfordern diese Konsequenzen weitreichende Korrekturen im Vergleich zu dem, was in der klassischen Physik über diesen Bereich angenommen wird. Aber es ist sehr fragwürdig, ob es plausibel ist, uns von der Quantenphysik unsere gesamte Ontologie festlegen zu lassen.

Noch gewichtiger als diese Überlegung sind meines Erachtens jedoch die Konsequenzen, die sich aus der Option für universellen Quanten-Holismus für die Philosophie des Geistes ergeben. Darauf möchte ich abschließend hinweisen. Wenn wir den Quanten-Holismus als universell im physikalischen Bereich betrachten, dann sehen wir die Quantenphysik so an, daß sie unmittelbar Konsequenzen hat, die bis hin zur Philosophie des Geistes reichen: Es gehört dann ja zu den Aufgaben der Interpretation der Quantentheorie, zu erklären, wieso die Welt uns ohne Zustandsverschränkungen erscheint. Wenn die Interpretation einer physikalischen Theorie unmittelbare Konsequenzen für die Philosophie des Geistes hat, dann ist es nicht nur methodologisch berechtigt, sondern sogar methodologisch geboten, diese Interpretation im Lichte dieser Konsequenzen zu bewerten.

Gemäß der Option für universellen Quanten-Holismus sind die Züge, die wir in unseren Wahrnehmungs-Überzeugungen physikalischen Dingen zuschreiben, relativ auf die Weise, wie wir diese Dinge beobachten. Wenn wir einen universellen Quanten-Holismus vertreten, dann sind wir auf die Position festgelegt, daß die Gegenstände unserer Wahrnehmungs-Überzeugungen abhängig sind von unseren Beobachtungsbedingungen, das heißt, dem

Abstrahieren von Zustandsverschränkungen. Albert und Loewer, 1988, räumen in ihrer Interpretation in Begriffen eines universellen Quanten-Holismus ein, daß streng genommen alle unsere Wahrnehmungs-Überzeugungen falsch sind (S. 209; siehe auch Albert, 1992, S. 127, 132–133). Denn die physikalischen Dinge haben ja objektiv nicht die Züge, die wir ihnen in unseren Wahrnehmungs-Überzeugungen zuschreiben. Lockwood, 1989, Kap. 9–13, 16, tritt für einen sehr weitgehenden Repräsentationalismus ein: Im Wahrnehmen sind wir uns nicht physikalischen Dingen unmittelbar bewußt, sondern mentalen Repräsentationen; nur mentale Repräsentationen haben die Merkmale, die wir in unserem Alltagsrealismus physikalischen Dingen zuschreiben; die Annahme, daß es eine physikalische Welt gibt, ist ein Schluß auf die beste Erklärung unserer mentalen Repräsentationen.

[180] In der heutigen Philosophie des Geistes ist hingegen ein *direkter Realismus* weit verbreitet: ungeachtet kausaler Bindeglieder gibt es keine mentalen Repräsentationen, die als *epistemisches* Bindeglied zwischen unser Wahrnehmen und die Welt treten. Im Wahrnehmen sind wir uns unmittelbar physikalischer Dinge und Ereignisse bewußt. Prominente Advokaten einer solchen Position sind zum Beispiel Davidson, 1983, und McDowell, 1994. Die Entwicklung hin zu einem direkten Realismus in der Erkenntnistheorie steht im Zusammenhang mit einer Entwicklung in der Semantik, die als *Externalismus* bekannt ist: die Bedeutung und der konzeptuelle Gehalt unserer Überzeugungen sind von der Beschaffenheit der physikalischen Umwelt abhängig. Die Beschaffenheit der physikalischen Umwelt, in der eine Person lebt, ist konstitutiv für die Individuation ihrer Überzeugungen, also konstitutiv für die Identität einer Überzeugung im Unterschied zu anderen Überzeugungen. Diese Position ist in der heutigen Philosophie des Geistes weitgehend akzeptiert. Das bekannteste Argument sind Gedankenexperimente, die auf den Aufsatz „The Meaning of ‘Meaning’“ von Putnam, 1975, zurückgehen. (McCulloch, 1995, ist eine hilfreiche Einführung in den gesamten Komplex.)

Wenn man die Option für universellen Quanten-Holismus im physikalischen Bereich für plausibel hält, dann ist man in der Philosophie des Geistes auf eine Position festgelegt, die in Opposition zu dem genannten Externalismus steht: Die Bedeutung der Wahrnehmungs-Überzeugungen einer Person ist durch etwas festgelegt, das dieser Person intern ist, nämlich die Weise, wie die physikalische Umwelt dieser Person als Welt von Dingen mit definiten Eigenschaften erscheint. Die physikalische Umwelt selbst weist aber wegen der universellen Zustandsverschränkungen nicht die Definitheit auf, durch die sie zur Individuation der Überzeugungen einer Person beitragen könnte. (Denn diese Umwelt kann ja nur in Begriffen einer uneigentlichen Mischung beschrieben werden).

Dieser kurze Hinweis auf die heutige Philosophie des Geistes zeigt: Man kann in der Interpretation der Quantentheorie nicht davon ausgehen, daß es hinreicht, zu erklären, wieso die Welt uns ohne Zustandsverschränkungen erscheint. Wenn man annimmt, daß Zustandsverschränkungen die gesamte physikalische Welt durchziehen, dann muß man Stellung beziehen in der Debatte um direkten Realismus und Externalismus in der heutigen Philosophie des Geistes. Man muß die Argumente für direkten Realismus und die Individuation unserer Überzeugungen durch die physikalische Umwelt entkräften. Umgekehrt gilt damit: Wenn man [181] diese Argumente für plausibel hält, dann kann man in der Interpretation der Quantentheorie nicht die Option für universellen Quanten-Holismus

vertreten. Man kann den Quanten-Holismus akzeptieren; aber man muß ihn dann so ansehen, daß er auf mehr oder weniger den mikrophysikalischen Bereich begrenzt ist.

Ich denke, dieser Hinweis auf die heutige Erkenntnistheorie und Semantik stützt ein Plädoyer für Zurückhaltung in der Interpretation der Quantentheorie: Die Frage nach der Reichweite des Holismus der Quantenphysik ist nicht durch den Hinweis auf den Forschungsstand der gegenwärtigen Physik beantwortet. Es ist daher sinnvoll, breitere philosophische Erwägungen hinzuziehen in der Bewertung der Optionen, die wir haben. Die dargestellten Erwägungen zeigen, daß wir dann, wenn wir den Quanten-Holismus für universell im physikalischen Bereich halten, allein aus Argumenten von dem Formalismus der Quantentheorie her in der Philosophie des Geistes auf eine Position festgelegt sind, die dort mit gewichtigen erkenntnis- und bedeutungstheoretischen Argumenten bestritten wird. Schon allein um uns Offenheit in der skizzierten Debatte in der Philosophie des Geistes bewahren zu können, sollten wir daher meines Erachtens eine behutsame Einstellung in der Frage nach der Reichweite des Quanten-Holismus einnehmen.

Zitierte Literatur

- [182] Albert, D. Z., 1992, *Quantum Mechanics and Experience*, Cambridge (Mass.): Harvard University Press.
- Albert, D. Z. & Loewer, B., 1988, „Interpreting the Many Worlds Interpretation“, *Synthese*, 77, S. 195–213.
- Aspect, A., Dalibard, J. & Roger, G., 1982, „Experimental Test of Bell’s Inequalities Using Time-Varying Analyzers“, *Physical Review Letters*, 49, S. 1804–07.
- Bell, J. S., 1964, „On the Einstein–Podolsky–Rosen–Paradox“, *Physics*, 1, S. 195–200.
- Bohm, D., 1951, *Quantum Theory*, Englewood Cliffs: Prentice-Hall.
- Bohm, D. & Hiley, B., 1993, *The Undivided Universe. An Ontological Interpretation of Quantum Theory*, London: Routledge.
- Bunge, M., 1985, *Treatise on Basic Philosophy. Volume 7. Epistemology & Methodology III: Philosophy of Science and Technology. Part I: Formal and Physical Sciences*, Dordrecht: Reidel.
- [183] Busch, P., Lahti, P. J. & Mittelstaedt, P., 1996, *The Quantum Theory of Measurement*, Berlin: Springer (Zweite Auflage. Erste Auflage 1991).
- Davidson, D., 1983, „A Coherence Theory of Truth and Knowledge“, in: D. Henrich (Hg.), *Kant oder Hegel?*, Stuttgart: Klett-Cotta, S. 423–38.
- Einstein, A., Podolsky, B. & Rosen, N., 1935, „Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete?“, *Physical Review*, 47, S. 777–80.
- Esfeld, M., 1998, „Holism and Analytic Philosophy“, *Mind*, 107, S. 365–80.
- Esfeld, M., im Erscheinen, „Holism in Cartesianism and in Today’s Philosophy of Physics“, *Zeitschrift für allgemeine Wissenschaftstheorie*, 30 (1999), S. 17–36.
- d’Espagnat, B., 1971, *Conceptual Foundations of Quantum Mechanics*, Menlo Park: Benjamin.
- French, S. & Krause, D., 1995, „Vague Identity and Quantum Non-Individuality“, *Analysis*, 55, S. 20–26.
- French, S. & Redhead, M. L. G., 1988, „Quantum Physics and the Identity of Indiscernibles“, *British Journal for the Philosophy of Science*, 39, S. 233–46.
- Ghirardi, G., Rimini, A. & Weber, T., 1986, „Unified Dynamics for Microscopic and Macroscopic Systems“, *Physical Review*, D34, S. 470–91.
- Giulini, D., Joos, E., Kiefer, C., Kupsch, J., Stamatescu, I.-O. & Zeh, H. D., 1996, *Decoherence and the Appearance of a Classical World in Quantum Theory*, Berlin: Springer.
- Healey, R. A., 1991, „Holism and Nonseparability“, *Journal of Philosophy*, 88, S. 393–421.
- Howard, D., 1989, „Holism, Separability, and the Metaphysical Implications of the Bell Experiments“, in: J. T. Cushing & E. McMullin (Hgg.), *Philosophical Consequences of Quantum Theory. Reflections on Bell’s Theorem*, Notre Dame: University of Notre Dame Press, S. 224–53.

- Howard, D., 1997, „Space-time and Separability: Problems of Identity and Individuation in Fundamental Physics“, in: R. S. Cohen, M. A. Horne & J. Stachel (Hgg.), *Potentiality, Entanglement and Passion-at-a-Distance. Quantum Mechanical Studies for Abner Shimony. Volume 2*, Dordrecht: Kluwer, S. 113–41.
- Landsman, N. P., 1995, „Observation and Superselection in Quantum Mechanics“, *Studies in the History and Philosophy of Modern Physics*, 26B, S. 45–73.
- [184] Lewis, D., 1986, *On the Plurality of Worlds*, Oxford: Blackwell.
- Liu, C., 1996, „Holism vs. Particularism: A Lesson from Classical and Quantum Physics“, *Zeitschrift für allgemeine Wissenschaftstheorie*, 27, S. 267–79.
- Lockwood, M., 1989, *Mind, Brain and the Quantum. The Compound 'I'*, Oxford: Blackwell.
- Lowe, E. J., 1998, „Entity, Identity and Unity“, *Erkenntnis*, 48.
- McCulloch, G., 1995, *The Mind and its World*, London: Routledge.
- McDowell, J., 1994, *Mind and World*, Cambridge (Mass.): Harvard University Press.
- Mittelstaedt, P., 1998, *The Interpretation of Quantum Mechanics and the Measurement Process*, Cambridge: Cambridge University Press.
- Neumann, Johann von, 1932, *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik*, Berlin: Springer.
- Penrose, Roger, 1994, *Shadows of the Mind*, Oxford: Oxford University Press.
- Primas, H., 1993, „The Cartesian Cut, the Heisenberg Cut, and Disentangled Observers“, in: K. V. Laurikainen & C. Montonen (Hgg.), *Symposium on the Foundations of Modern Physics 1992. The Copenhagen Interpretation and Wolfgang Pauli*, Singapore: World Scientific, S. 245–69.
- Putnam, H., 1975, „The Meaning of 'Meaning'“, in: H. Putnam, *Mind, Language and Reality. Philosophical Papers Volume 2*, Cambridge: Cambridge University Press, S. 215–71. (deutsch: *Die Bedeutung von „Bedeutung“*. Übersetzt von Wolfgang Spohn, Frankfurt (Main): Klostermann 1979).
- Robinson, D., 1992, „On Healey's Holistic Interpretation of Quantum Mechanics“, *International Studies in the Philosophy of Science*, 6, S. 227–40.
- Scheibe, E., 1991, „Substances, Physical Systems, and Quantum Mechanics“, in: G. Schurz & G. J. W. Dorn (Hgg.), *Advances in Scientific Philosophy. Essays in Honour of Paul Weingartner*, Amsterdam: Rodopi, S. 215–29.
- Schrödinger, E., 1935, „Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik“, *Naturwissenschaften*, 23, S. 807–812, 823–828, 844–849.
- Shimony, A., 1986, „Events and Processes in the Quantum World“, in: R. Penrose & C. J. Isham (Hgg.), *Quantum Concepts in Space and Time*, Oxford: Clarendon Press, S. 182–203.
- [185] Smith, G. J. & Weingard, R., 1987, „A Relativistic Formulation of the Einstein–Podolsky–Rosen Paradox“, *Foundations of Physics*, 17, S. 149–71.
- Teller, P., 1986, „Relational Holism and Quantum Mechanics“, *British Journal for the Philosophy of Science*, 37, S. 71–81.
- Tittel, W., Brendel, J., Gisin, B., Herzog, T., Zbinden, H. & Gisin, N., 1998, „Experimental Demonstration of Quantum-Correlations over more than 10 Kilometers“, *Physical Review*, A57, S. 3229–32.
- van Fraassen, B. C., 1991, *Quantum Mechanics: An Empiricist View*, Oxford: Clarendon Press.

Anschrift des Verfassers:

Dr. Michael Esfeld
 Universität Konstanz
 Zentrum Philosophie und Wissenschaftstheorie
 Postfach 5560 D24
 D-78457 Konstanz
 Michael.Esfeld@uni-konstanz.de