

Quantenphysik und Quantenalltag

Harald Atmanspacher

Institut für Grenzgebiete der Psychologie,
Wilhelmstr. 3a, D-79098 Freiburg

1 Einleitung

“Man klagt zu Unrecht, dass unsere Zeit keine Philosophen mehr habe”, pflegte der Theologe und Wissenschaftsorganisator von Harnack zu sagen (Seelig 1952, S. 51), “sie sitzen nur jetzt in der anderen Fakultät, und ihre Namen sind Planck und Einstein.”

Mit beiden Namen sind die Anfänge der Quantenphysik in den ersten Jahren des 20. Jahrhunderts untrennbar verbunden. Doch es sollte bis zum Beginn der dreissiger Jahre dauern, bis von Bohr, Heisenberg, Pauli, Schrödinger, von Neumann und anderen solide formale Vorstellungen ausgearbeitet wurden, die den Begriff einer physikalischen Theorie rechtfertigen. Seither entwickelt sich die Quantentheorie ständig weiter und gilt heute als die empirisch am besten bestätigte Theorie im Bereich der Physik.

Fast alle, die zur Entwicklung der Quantentheorie massgeblich beigetragen haben, interessierten sich nicht nur für theoretische und experimentelle Fragen im engeren Sinn der Physik, sondern auch für die damit verbundenen philosophischen, insbesondere erkenntnistheoretischen Probleme. Vor allem führte dies zu einer ganzen Reihe unterschiedlicher Versuche, sowohl für den Formalismus der Theorie als auch für experimentelle Resultate einen kohärenten Zusammenhang mit unserem Verständnis von Wirklichkeit herzustellen.

Unter allen physikalischen Theorien traten in der Quantenphysik mit besonderer Schärfe Probleme in Erscheinung, die ein naives, vom sogenannten “gesunden Menschenverstand” geleitetes Verständnis von Wirklichkeit radikal hinterfragten. In diesem Sinn zeigt sich bis heute immer wieder, wie sogenanntes “anschauliches bildhaftes Denken” in die Irre führen und somit einen blockierenden statt förderlichen Faktor bei Erkenntnisprozessen darstellen kann. So betonte Bohr im Hinblick auf die Quantentheorie immer wieder das “Versagen der Anschauungsformen, die an unsere gewöhnlichen Sinneseindrücke angepasst sind”.¹

¹Im englischen Original (Bohr 1934, S. 93): “... failure of the forms of perception adapted to our ordinary sense impressions”, oder ähnlich auf S. 51, 96, 103, 108, 111. Und (S. 5): “... we are concerned with the recognition of physical laws which lie outside the domain of our ordinary

Die begrifflichen Grundzüge der Quantenphysik kann man, entgegen anderslautender Behauptungen, nicht nur mit subtilen Kenntnissen höherer Mathematik verstehen. Es gilt jedoch, von eingefahrenen Denkgewohnheiten Abschied zu nehmen, um solches Verständnis zu erlangen. Wenn das gelingt, dann kann der “gesunde Menschenverstand”, wenn er wirklich gesund ist, zu beachtlichen Einsichten führen. Es ist eine spezielle Pointe der Quantentheorie, dass das eigentlich Revolutionäre an ihr am Ende nicht etwa unverständlich und auf die Mikrowelt beschränkt ist, sondern auch einen veränderten Zugang zur Alltagswelt eröffnet.

Damit ist nicht nur gemeint, dass bis zu 40% des weltweiten Bruttosozialprodukts ohne Quantentheorie nicht möglich wären.² Vor allem geht es darum, auf welche Weise grundlegende Konzepte der Quantentheorie, wie etwa die Komplementarität von Beschreibungen oder die Verschränktheit von Zuständen, in ganz alltäglichen Situationen und Zusammenhängen auftreten können.

2 Lektionen der Quantenphysik

Was ist der Grund dafür, dass sich gerade die Quantenphysik im Vergleich zu anderen Gebieten der Physik, wie etwa der klassischen Mechanik, Elektrodynamik und Thermodynamik, als so notorisch “philosophieträchtig” erwiesen hat? Ein zentraler Punkt, der in diesem Zusammenhang von Anfang an diskutiert wurde, besteht in der Rolle des Prozesses der *Beobachtung* bzw. der *Messung*.

In der Physik wurde bis zum Ende des 19. Jahrhunderts davon ausgegangen, dass das Resultat einer Beobachtung bzw. Messung etwas über denjenigen Zustand eines Systems aussagt, in dem es sich vor der Messung befunden hat. Diese Annahme bedeutet, dass zwischen dem Zustand vor der Messung und dem gemessenen Zustand, abgesehen von Messungenauigkeiten, kein wesentlicher Unterschied besteht. Im Gegensatz dazu sind der Zustand eines Quantensystems vor der Messung und sein Zustand nach der Messung im allgemeinen nicht identisch; die Messung verändert den Zustand.

Dies liegt nicht etwa daran, dass Quantensysteme wegen ihrer mikroskopischen Dimensionen besonders störanfällig sind; es gibt Experimente mit makroskopischen Quantensystemen (Marcikic *et al.* 2003), deren räumliche Ausmasse Kilometer erreichen! Die Ursache liegt vielmehr darin begründet, dass typische Eigenschaften von Quantensystemen in einer speziellen Beziehung zueinander stehen, die man *Nichtvertauschbarkeit* (oder auch Nichtkommutativität) nennt. Ein bekanntes Beispiel sind Ort und Impuls eines Teilchens, zwischen denen als Folge der Nichtvertauschbarkeit

experience and which present difficulties to our accustomed forms of perception.”

²Diese Angabe beruht auf einer Schätzung des amerikanischen Physikers Leon Lederman. Ohne Quantenphysik gäbe es keine Transistoren oder andere Halbleiter, die die Grundlage der gesamten Mikroelektronik bilden. Ebenso würden ohne Quantenphysik die Grundlagen der modernen Chemie und Energietechnik sowie der Bio-, Nano- und Lasertechnologie fehlen (Hasinger 2007, S. 30).

eine sogenannte Unschärferelation besteht. Sie impliziert, dass die Resultate einer Orts- und Impulsmessung davon abhängen, in welcher Reihenfolge sie durchgeführt werden.

Etwas allgemeiner formuliert, steht der Vorgang der Messung zwischen dem “So-Sein” eines Systems an sich und der Art und Weise, wie sich dieses System durch eine Messung präsentiert. Die kontroversen Diskussionen hierzu, die Einstein und Bohr in den 1920er und 1930er Jahren wiederholt führten, beruhten auf unterschiedlichen erkenntnistheoretischen Standpunkten. Während Einstein dabei die Position vertrat, dass es auch ohne Beobachtung eine Wirklichkeit gebe, die objektiven Bestand hat (“der Mond ist auch dann da, wenn niemand hinschaut”, vgl. Mermin 1985), stellte Bohr die Bedeutung des empirischen Zuganges in den Vordergrund (“Phänomene sind nur dann Phänomene, wenn sie beobachtete Phänomene sind”, vgl. Cramer 1986).

Aus heutiger Sicht (siehe zum Beispiel Howard 2007) kann man sagen, dass die *Bohr-Einstein-Diskussionen* wesentlich darunter gelitten haben, dass keiner von beiden seinen philosophischen Ausgangspunkt hinreichend explizit gemacht hat. Tut man dies, so lassen sich eine ganze Reihe von sogenannten Paradoxa der Quantentheorie in einem Licht darstellen, das mit tatsächlichen Widersprüchen wenig zu tun hat (Atmanspacher and Primas 2003). Die zentrale Frage lautet dann eher, wie der Zusammenhang zwischen beiden Positionen auszusehen hat, damit ein umfassenderes Gesamtbild entstehen kann.

Diese Frage ist bis in die Gegenwart nicht endgültig geklärt und stösst auf viele formale wie konzeptuelle Schwierigkeiten. Klar ist hingegen, dass die Bedeutung zweier einander ausschliessender, aber ergänzender (“komplementärer”) erkenntnistheoretischer Positionen für die Physik erstmals in der Quantentheorie deutliche Konturen erhält. Wie wir heute wissen, hängt sie eng mit dem Phänomen der Nichtvertauschbarkeit zusammen.

An die erwähnte Unterscheidung schliessen sich etliche andere Problembereiche an, die in der Debatte um die *Interpretation der Quantentheorie* immer wieder auftauchen. Einige Beispiele sind die Unterscheidung von individuellen und statistischen Beschreibungen, isolierten und offenen Systemen, universellen und kontextuellen Gesetzen, reversiblen und irreversiblen zeitlichen Entwicklungen, und dergleichen mehr. Auch hier ist davon auszugehen, dass die Lösung nicht in einem pauschalen “entweder–oder”, sondern in einem differenzierten, je nach Kontext zu diskutierenden “sowohl–als auch” zu suchen ist. Auf diese Weise zwingt die Quantentheorie dazu, Denkgewohnheiten zu hinterfragen, die in der klassischen Physik (und darüber hinaus) weithin als selbstverständlich gelten.

Ein hilfreicher Begriff bei der Diskussion all dieser Fragen, der von Heisenberg (1935) stammt, ist der eines konzeptuellen “Schnittes”, der in einem Gesamtsystem das Objekt der Beobachtung von dessen Umgebung (inklusive der Beobachtungsmittel) trennt. Dieser oft als *Heisenberg-Schnitt* bezeichnete Vorgang der Trennung umschreibt die Zerlegung eines Gesamtsystems in Teile. Diese Zerlegung ist nicht ein für alle Mal vorgegeben, sondern hängt von Kontexten ab, die sich beispielsweise in

der Wahl einer experimentellen Anordnung widerspiegeln.

Verschiedene Zerlegungen schliessen sich zwar gegenseitig aus; ein umfassendes Gesamtbild des unzerlegten Systems entsteht jedoch nur durch ihre gemeinsame Berücksichtigung. Wichtig ist in diesem Zusammenhang, dass die Beschreibung des Gesamtsystems – anders als in der klassischen Physik – nicht von vornherein mit der Beschreibung der zerlegten Teilsysteme identisch ist. Salopp gesagt handelt es sich um ein Ganzes, das nicht aus Teilen besteht, wie Primas (1993) das formuliert hat. Somit liegt in der Quantentheorie ein Konzept von Ganzheit vor, das weitaus radikaler ist als viele seiner Varianten in anderen Bereichen der Wissenschaft.

Die theoretische Fundierung dieses quantentheoretischen *Holismus* geht auf ein Gedankenexperiment von Einstein, Podolsky und Rosen (1935), dessen Modifikation durch Bohm und schliesslich auf einen genialen Gedankengang von Bell (1964) zurück. Mit Bells Argumenten wurde es möglich, experimentell zwischen einer klassisch-lokalen und einer quanten-holistischen Charakterisierung des Zustandes eines Quantensystems vor dessen Messung zu unterscheiden.³ Die empirischen Resultate bestätigten, dass die von Einstein geforderte Unabhängigkeit der Eigenschaften physikalischer Objekte an verschiedenen Orten, ein *lokaler Realismus*, nicht von vornherein als gegeben vorausgesetzt werden darf.

Die empirischen Belege für die Ganzheit des Zustandes eines Gesamtsystems vor der Messung, die mit der Messung erbracht werden, nennt man nach Einstein, Podolsky und Rosen *EPR-Korrelationen*. Sie stehen für eine holistische Wirklichkeitsauffassung, die für Quantensysteme heute ebenso unbestritten ist wie sie, gemessen am Bereich der Alltagserfahrungen, zunächst kontraintuitiv zu sein scheint.

Auf diese Weise hat die Quantentheorie, die zu ihrer Entstehungszeit angetreten war, um das atomistisch bestimmte Forschungsparadigma der Physik zu vollenden, dazu geführt, dass gerade das Gegenteil des Atomismus in der Physik eine solide Grundlage erhielt. Aus philosophischer Sicht sind im Zusammenhang damit zwei Punkte besonders interessant, die derzeit unter Wissenschaftlern und Wissenschaftsphilosophen vermehrt gesehen und diskutiert werden.

Erstens stellt der quantentheoretische Holismus einen substantiellen Beitrag der Physik zu einem Problem der *Metaphysik* dar. Er macht nämlich Aussagen über den Zustand eines Systems in einer Situation, in der dieser prinzipiell nicht empirisch zugänglich ist – den Zustand vor der Messung. Und zweitens erhält durch den quantentheoretischen Holismus die *Reduktionismusdebatte* der Physik eine neue Wendung. Wenn Systeme nicht schlicht aus Teilen bestehen, sondern es komplizierter Prozeduren und Argumente bedarf, um eine Beschreibung in Form von Teilen zu rechtfertigen, kann nicht davon ausgegangen werden, dass die gesamte materielle Wirklichkeit vollständig auf die Eigenschaften und das Verhalten der Elementarteilchen der Physik reduzierbar ist.

³Die entsprechenden Experimente gelangen mit überzeugenden Resultaten erstmals Aspect und Mitarbeitern in Paris (Aspect *et al.* 1982).

3 Komplementarität und Verschränkung

Zwei Schlüsselbegriffe in diesem Diskurs, die von ausschlaggebender Bedeutung für die Quantenphysik sind, heißen *Komplementarität* und *Verschränkung*. Niels Bohr, der den ersten dieser beiden Begriffe 1927 in die Physik importierte (Bohr 1928) und den zweiten (eingeführt durch Schrödinger 1935) entscheidend mitprägte (Bohr 1935), war stets davon überzeugt, dass ihnen eine weltanschauliche Relevanz zukommt, die den Bereich der Physik weit überschreitet. Bohr selbst hat allerdings diese Idee nie im Detail oder konkret ausgeführt, und lange Zeit nach ihm hat dies ebenfalls niemand getan.

Woher kam seine Überzeugung? Im Fall der Komplementarität ist sie dadurch nachvollziehbar, dass Bohr mit der Idee der Komplementarität durch den Psychologen Arthur Rubin sowie, indirekter, William James vertraut gemacht wurde (Plaum 1992). Rubin betrachtete die unterschiedlichen Optionen, Kippfiguren wahrzunehmen, als komplementäre Betrachtungsweisen, und Bohr übertrug dies zunächst auf den Dualismus von Welle und Teilchen. Später sollte sich herausstellen, dass dieser Dualismus auf der Frage der (mathematischen) Darstellung des betrachteten Systems beruht. Zwei Darstellungen sind dann komplementär, wenn sie (i) für eine *vollständige* Beschreibung des Systems beide erforderlich sind, (ii) jedoch miteinander inkompatibel sind, z.B. sich widersprechen.

Durch den Einfluss der Philosophen Höfding und, indirekter, Kierkegaard, spezialisierte Bohr bald über Beispiele für Komplementarität, die philosophischen Themenkreisen entstammen.⁴ So sprach er etwa über eine Komplementarität zwischen Wissen und Lernen, zwischen der Definition und der Verwendung eines Begriffs, zwischen Klarheit und Wahrheit, oder zwischen Güte und Gerechtigkeit. Ein erhellendes Beispiel, das von James (1890, S. 284) stammt, ist die Komplementarität von Glaube und Zweifel. Die logische Negation von Glaube wäre Unglaube, aber das trifft eben nicht die Idee der Komplementarität.

Das Konzept der Verschränkung ist mit dem der Komplementarität eng verwandt. Während Komplementarität auf die verschiedenen “Blickwinkel” zielt, unter denen man eine Situation betrachten kann, kennzeichnet Verschränkung die ganzheitliche Qualität eines Zustandes. Wie oben erwähnt, führt seine Beobachtung als Eingriff dazu, dass diese Ganzheit zerstört wird. Als Folge davon entstehen Korrelationen zwischen den entstehenden Teilen des Ganzen. In der Quantenphysik sind dies die EPR-Korrelationen, die zusammen mit der Entstehung der Teile qua Messung verifiziert werden können.

Sobald ein direkter sinnlicher Zugang zu einer Situation auf so grundsätzliche Weise wie hier in Frage steht, mögen anschauliche Darstellungen zwar einfach sein, aber sie sind dann auch leicht falsch. Es darf als eine der Lektionen der Quan-

⁴Man könnte dies den Schritt von der “speziellen Komplementarität” der Quantenmechanik zu einer “allgemeinen Komplementarität” nennen, die über die Grenzen der Physik hinausgeht. Pauli (1933, S. 89) hatte bereits, in Analogie zum Begriff der “Relativitätstheorie”, für die Quantentheorie die Bezeichnung “Komplementaritätstheorie” vorgeschlagen.

tenphysik gelten, dass ihre Veranschaulichung oft zu den irreführenden klassischen Bildern führt, die durch die Quantenphysik gerade überwunden werden. Schwierige und ungewohnte Sachverhalte versteht man nicht durch billige Vereinfachung, sondern durch die Einsicht dessen, was daran schwierig und ungewohnt ist.⁵

Wie weiter oben bemerkt, ist ein verschränkter Zustand nicht etwa eine “Überlagerung” möglicher Messzustände, sondern es handelt sich in der Tat um eine grundlegend andere Art von Zustand, der erst durch einen Messprozess oder anderen Eingriff in die Klasse der messbaren Zustände überführt wird. In diesem Sinn sind verschränkte Zustände nicht Gegenstand der direkten Beobachtung.⁶

Dieser im Grunde einfache Gedankengang lässt sich auf verschiedene Weise diskutieren, die seine unterschiedlichen Konsequenzen unterstreichen. Einmal kann die Relation zwischen dem Ganzen und den Teilen als Relation zwischen ontischen und epistemischen Zuständen diskutiert werden. Des weiteren kann die Entstehung von Teilen als Brechung einer Symmetrie (Verletzung einer Invarianz) interpretiert werden: Dinge, die zunächst nicht unterscheidbar sind, können nach einem entsprechenden Eingriff unterschieden werden. Dieses Prinzip liegt an der Basis üblicher (expliziter) Formen von Erkenntnis.

Etwas formaler stehen sowohl Komplementarität als auch Verschränkung damit in Zusammenhang, dass es Systemeigenschaften gibt, die nicht vertauschen. Das heisst nichts anderes, als dass es bei einer sequentiellen Beobachtung von zwei solchen Eigenschaften A und B darauf ankommt, in welcher Reihenfolge die Beobachtungen vorgenommen werden. Dies lässt sich durch eine einfache Ungleichung ausdrücken:

$$AB \neq BA$$

Die Menge der Eigenschaften wird in diesem Fall als nicht-kommutative Algebra bezeichnet.

Eine Alternative zur Formulierung durch Nicht-Vertauschbarkeit liegt in der formalen Struktur von Aussagen, die bei komplementären Sachverhalten getroffen werden können. Die entsprechende Aussagenlogik, oder Algebra der Aussagen, ist dann nicht-Boolesch, d.h. die Annahme des *tertium non datur*, die der klassischen Logik zugrundeliegt, ist verletzt. Es gibt nicht nur zu jeder wahren Aussage ihre Negation, die falsche Aussage (“entweder–oder”), sondern Aussagen können darüber hinaus komplementär sein. Dies führt auf eine partiell Boolesche Struktur, in der Boolesche und nicht-Boolesche Domänen auf passende Weise “zusammengesetzt” sind (Primas 2007).

⁵Damit verbindet sich ein nachdrückliches Plädoyer gegen falsch verstandene Konkretisierung und Anschaulichkeit. Wie Kognitionswissenschaftler jüngst herausfanden, kann es bei Lernprozessen sehr förderlich sein, zuerst abstrakte Prinzipien und erst danach konkrete Beispiele dafür zu lernen (Kaminski *et al.* 2008). Dieser Befund stellt ein lange sorgsam gehegtes Dogma in Erziehung und Ausbildung vom Kopf auf die Füße.

⁶Auf diese Problematik zielt Sudarshan (1983) mit seiner Frage, ob menschliche Subjekte in speziellen Zuständen des Gewahrseins quantenartige Systeme mentaler Natur nicht doch direkt beobachten können. Mehr dazu später.

Was bedeutet das für Bohrs alte Idee einer Verwendung von Komplementarität und Verschränkung jenseits der Quantenphysik? Es bedeutet, dass eine formal saubere und inhaltlich substantielle Übertragung dann möglich sein könnte, wenn es gelingt, das betrachtete ausserphysikalische System auf der Basis eines der genannten Ansätze zu diskutieren. Angesichts der Mysteriosität, die der Quantenphysik ebenso häufig wie übertrieben zugeschrieben wird, mutet dies auf den ersten Blick exotisch an. Aber auch hier könnte eine Idee von Bohr hilfreich sein (zitiert nach Dyson 1958): “Die Frage ist nicht, ob eine Theorie zu verrückt ist, sondern ob sie verrückt genug ist.”

4 Quantentheorie jenseits der Quantenphysik

In der Tat hat es in den vergangenen Jahren einige Forschungsansätze gegeben, die den alten Vorschlag von Bohr aufgegriffen haben. Historisch an erster Stelle sind dabei Arbeiten seit den frühen 1990er Jahren aus der Gruppe von Aerts in Brüssel zu nennen.⁷ Seit 2000 wurde von Atmanspacher *et al.* (2002, 2006) ein axiomatischer Rahmen entwickelt, der als formale Grundlage für einzelne Anwendungen dienen kann und ausserdem im Einzelnen die Schritte zeigt, die von Nicht-Vertauschbarkeit *per se* zur konventionellen Quantenphysik zurückführen. Schliesslich hat Primas (2007) eine Formulierung von Komplementarität mit partiell Booleschen Algebren vorgeschlagen, die unter den genannten Arbeiten die allgemeinste und abstrakteste ist.

Die besondere Stärke des Ansatzes einer “verallgemeinerten Quantentheorie” besteht darin, dass er sowohl einen formalen Rahmen liefert, dessen Zusammenhang mit der konventionellen Quantenphysik transparent ist, als auch erfolgreich eine Reihe konkreter Beispiele beschreibt, die auf überraschende Resultate (empirisch wie konzeptuell) führten. Zwei davon werde ich anschliessend etwas ausführlicher darstellen: Komplementarität und Verschränkung bei der Wahrnehmung von Kippfiguren sowie die Komplementarität von Wissen und Lernen.

Vorher möchte ich allerdings einige jüngere Ansätze zu einem der grössten und widerständigsten Probleme der europäischen Geistesgeschichte vorstellen: der Frage nach den Beziehungen zwischen Bewusstsein und Materie (dazu zählt auch das Gehirn). Lösungen sind dabei noch nicht in Sicht, doch die Komplementarität alternativer Betrachtungsweisen eröffnet interessante neue Perspektiven, denen es sich nachzugehen lohnt.

Das Hauptziel dieser Beispiele ist, ein Gefühl dafür zu vermitteln, inwiefern Nicht-Vertauschbarkeit *kein* exotischer Sonderfall ist. Vielmehr handelt es sich um die Regel, von der vertauschbare Operationen, wie wir sie etwa in den Grundrechenarten des Primarschulunterrichtes lernen, die Ausnahme darstellen. Ein Beispiel, das in seiner Trivialität fast unschlagbar ist: Jeder, der schon einmal ver-

⁷Für einen verbandstheoretischen Ansatz exemplarisch ist Aerts *et al.* (1993), für die Anwendung auf kognitive Probleme Aerts and Aerts (1994).

sucht hat, durch eine Tür zu gehen (A), bevor er sie geöffnet hat (B), weiss, dass AB nicht gleich BA ist. Beispiele dieses Typs sind so elementar und alltäglich, dass auch ohne grosse Phantasie sofort jedem eins einfällt.

4.1 Bewusstsein und Materie

Im Zusammenhang mit dem Thema Beobachtung wird oft mehr oder weniger selbstverständlich unterstellt, dass dabei letztlich auch das menschliche *Bewusstsein eines Beobachters* involviert ist. So kann man zwar argumentieren, doch es muss klar sein, dass sich die Quantentheorie als Theorie der materiellen Wirklichkeit nicht mit Bewusstsein als mentaler Kategorie beschäftigt. Beobachtung im Sinne der Quantenphysik ist immer ein Akt der Registration eines Ereignisses durch eine physikalische Apparatur, bei der Fragen des Bewusstseins ausgeklammert bleiben. Anders gesagt: das menschliche Bewusstsein spielt im Rahmen des gegenwärtigen Standes der Theorie bei der Beobachtung von Quantensystemen genau die gleiche Rolle wie bei der Beobachtung von klassischen Systemen.

Pauli (1954) schrieb in diesem Zusammenhang in einem Brief an Fierz: “Es könnte doch sein, dass wir die Materie, z.B. im Sinne des Lebens betrachtet, nicht ‘richtig’ behandeln, wenn wir sie so beobachten, wie wir es in der Quantenmechanik tun, nämlich vom inneren Zustand des ‘Beobachters’ dabei ganz absehend.” Pauli sah im Problem der Beobachtung in der Quantenmechanik eine Unvollständigkeit, bei der es – anders als in Einsteins Auffassung – “nicht um eine Unvollständigkeit der Quantenmechanik innerhalb der Physik, sondern um eine Unvollständigkeit der Physik innerhalb des gesamten Lebens” geht.

Inwieweit diese Unvollständigkeit prinzipieller Natur ist, also auf eine ontologische Verschiedenheit von Bewusstsein und Materie hinweist, oder lediglich eine Sache der Beschreibung, ist seit Jahrhunderten Gegenstand der Debatte. Pauli und Jung haben über die Idee nachgedacht, dass der psychophysischen Dualität eine psychophysisch neutrale Einheit zugrundeliegt, die sie gelegentlich als *unus mundus* der Archetypen bezeichneten (Pauli 1948). Gegenwärtig werden derartige “Doppelaspekt-Theorien”, die bis auf Spinoza zurückgehen (Seager 2008), wieder vermehrt diskutiert. Ein vielbeachteter Ansatz darunter ist beispielsweise der von Chalmers (1996).

Pauli spekulierte gern darüber, inwieweit man die Dualität von psychischen und physikalischen Aspekte des *unus mundus* zu einer Komplementarität verschärfen kann (Pauli 1952, p. 164): “Es wäre am meisten befriedigend, wenn sich Physis und Psyche als komplementäre Aspekte derselben Wirklichkeit auffassen liessen.” Diese Idee wurde von Velmans (2008) und Primas (2008) aufgegriffen, die auf unterschiedliche Weise versuchen, Bewusstsein und Materie als komplementäre Aspekte der Natur zu verstehen. Diese und andere Ansätze, die in eine solche Richtung zielen, betreten komplettes wissenschaftliches Neuland. Die ausdrücklich *unanschauliche* Domäne des *unus mundus* ist mit derzeitiger empirischer Forschung prinzipiell nicht erreichbar.

4.2 Nichtvertauschbare Operationen in der Psychologie

Andere Arten von Komplementarität, die auf der Nichtvertauschbarkeit von mentalen Operationen beruhen, sind im Vergleich dazu einfacher. Beispiele, die in diese Klasse fallen, haben damit zu tun, was man oft einen Reihenfolgeeffekt nennt: das Resultat aufeinanderfolgender Operationen hängt von der Reihenfolge ihrer Durchführung ab. Ein wohlbekanntes Beispiel sind solche Effekte bei Lernprozessen. So gehört es zu den menschlichen Grunderfahrungen, dass Lernen und Wissen nicht vertauschbar sind. Viele Dinge weiss man nur dann, wenn man sie vorher gelernt hat – die umgekehrte Reihenfolge ist zwar nicht grundsätzlich verboten, aber sie darf wohl in der Regel als unfruchtbar gelten.

Mit numerischen Studien von Lernprozessen mit artifiziellen Netzwerken kann man solche Reihenfolgeeffekte analytisch untersuchen (Atmanspacher und Filk 2006). Zum Beispiel lassen sich solche Netzwerke so “trainieren”, dass sie Muster lernen und wiedererkennen können. Dabei zeigt sich, dass sie in der Tat nicht bloss die Muster als solche lernen, sondern zugleich auch die Reihenfolge, in der sie sie lernen. Das führt dazu, dass eine Serie von Mustern dann besonders gut wiedererkannt wird, wenn sie in der Reihenfolge des Lernens präsentiert werden. Andernfalls kommt der Prozess des Wiedererkennens typischerweise nicht zum Ziel.

Ähnliche Reihenfolgeeffekte gibt es bei allen Arten von Befragungen in der Psychologie (Schwarz und Sudman 1992), was zum Beispiel beim Design von Fragebogen berücksichtigt werden muss. Einige Aspekte davon wurden von Aerts *et al.* (2004) untersucht. Allgemeiner geht es dabei um die Dynamik, die Entscheidungsprozessen zugrundeliegt. Dazu gibt es eine detaillierte Studie von Busemeyer *et al.* (2006). In allen diesen Arbeiten ist die Nichtvertauschbarkeit mentaler Operationen ein wesentlicher Kernpunkt.

Eine zweite Anwendung der erwähnten verallgemeinerten Quantentheorie ist die Wahrnehmung von Kippfiguren – das Thema, das Bohr seinerzeit zur Einführung des Komplementaritätsidee in die Quantenmechanik inspirierte. Die Vorgänge, die dabei eine Rolle spielen, kann man ebenfalls mit nichtvertauschbaren Operationen modellieren (Atmanspacher *et al.* 2004, 2008a). Hier sind es zwei Typen von Dynamik, die nicht vertauschen: die Dynamik des Kippvorgangs und die Dynamik der Beobachtung des jeweiligen Stimulus. Das erarbeitete Modell steht in guter Übereinstimmung mit einer Reihe von experimentellen Resultaten und hat sich damit bereits ein ganzes Stück weit bewährt.

Darüber hinaus ist es eine plausible Annahme, dass es mentale Zustände gibt, welche sich nicht eindeutig einer der beiden Optionen einer Kippfigur zuordnen lassen und sozusagen, etwa als Übergangszustände, “dazwischen” liegen. Der Physiker Sudarshan schlug bereits vor 25 Jahren vor, derartige Zustände als verallgemeinerte verschränkte Zustände zu betrachten.⁸ Wie so etwas durch eine geeignete Kombi-

⁸Siehe Sudarshan (1983), p. 466: “sensations, feelings, and insights are not neatly categorized into chains of thoughts, nor is there a step-by-step development of a logical-legal argument-to-conclusion. Instead, patterns appear, interweave, coexist; and sequencing is made inoperative.

nation von Theorie und Experiment nachgewiesen werden könnte, wurde kürzlich ausformuliert (Atmanspacher *et al.* 2008b).

5 Schluss

Die zuletzt aufgeführten Beispiele illustrieren deutlich, wie Grundkonzepte der Quantentheorie in der Tat bei Situationen des gewöhnlichen Alltags zum Zuge kommen. Damit soll aber nicht der Alltag so mystifiziert werden, wie manche Physiker die Quantenphysik zu mystifizieren versucht haben. Vielmehr geht es darum, dass das, was sich in der Quantenphysik als das begrifflich Entscheidende herausgestellt hat, erstens keineswegs unverständlich ist und zweitens nicht für sie allein zutrifft.

Ein durch die Quantentheorie inspiriertes, aber über sie hinausgehendes Verständnis von Wirklichkeit erzwingt es, eingefahrene Denkweisen zu revidieren und einem übertriebenen Hang zu anschaulichen Weltbildern zu widerstehen. Das Boolesche “entweder-oder” in der Logik und das Kommutativgesetz beim Rechnen sind Spezialfälle, die selbstverständlich ihre eigene Bedeutung haben. Es wäre jedoch falsch zu glauben, dass das, was sie verallgemeinert, nur für exotische Teilchen und Felder gilt und mit dem normalen Leben nichts zu tun hat. Das Gegenteil ist der Fall.

Literatur

Aerts D. and Aerts S. (1994): Applications of quantum statistics in psychological studies of decision processes. *Foundations of Science* **1**, 85–97.

Aerts D., Broekaert J., and Gabora L. (2004): A case for applying an abstracted quantum formalism to cognition. Preprint available at LANL quant-ph/0404068v1.

Aerts D., Durt T., Grib A., Van Bogaert B., and Zapatin A. (1993): Quantum structures in macroscopical reality. *International Journal of Theoretical Physics* **32**, 489–498.

Aspect A., Dalibard J., and Rogers G. (1982): Experimental test of Bell’s inequalities using time-varying analyzers. *Physical Review Letters* **49**, 1804–1807.

Atmanspacher H., Bach M., Filk T., Kornmeier J., Römer H. (2008a): Cognitive time scales in a Necker-Zeno model for bistable perception. *Open Cybernetics and Systemics Journal* **2**, 234–251.

Atmanspacher H., Filk T., Römer H. (2004): Quantum Zeno features of bistable perception. *Biological Cybernetics* **90**, 33–40.

Conclusion, premises, feelings, and insights coexist in a manner defying temporal order.”

- Atmanspacher H., Filk T., Römer H. (2008b): Complementarity and bistable perception. In *Recasting Reality. Wolfgang Pauli's Philosophical Ideas and Contemporary Science*, ed. by H. Atmanspacher and H. Primas, Springer, Berlin, pp. 135–150.
- Atmanspacher H., Filk T. (2006): Complexity and non-commutativity of learning operations on graphs. *BioSystems* **85**, 84–93.
- Atmanspacher H., Filk T., and Römer H. (2006): Weak quantum theory: Formal framework and selected applications. In *Quantum Theory: Reconsideration of Foundations-3*, ed. by G. Adenier, A. Khrennikov, and Th.M. Nieuwenhuizen. American Institute of Physics, New York, pp. 34–46.
- Atmanspacher H. and Primas H. (2003): Epistemic and ontic quantum realities. In *Time, Quantum, and Information*, ed. by L. Castell and O. Ischebeck, Springer, Berlin, pp. 301–321.
- Atmanspacher H., Römer H., and Walach H. (2002): Weak quantum theory: complementarity and entanglement in physics and beyond. *Foundations of Physics* **32**, 379–406.
- Bell J. (1964): On the Einstein-Podolsky-Rosen paradox. *Physics* **1**, 195–200.
- Bohr N. (1928): The quantum postulate and the recent development of atomic theory. *Nature (Suppl.)* **121**, 580–590.
- Bohr N. (1935): Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete? *Physical Review* **48**, 696–702.
- Bohr N. (1934): *Atomic Theory and the Description of Nature*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Busemeyer J.R., Wang Z., Townsend J.T. (2006): Quantum dynamics of human decision making. *Journal of Mathematical Psychology* **50**, 220–241.
- Chalmers D. (1996): *The Conscious Mind*. Oxford University Press, Oxford.
- Cramer J.G. (1986): The transactional interpretation of quantum mechanics. *Reviews of Modern Physics* **58**, 647–687.
- Dyson F.J. (1958): Innovation in physics. *Scientific American* **199**(3), September, 74–82.
- Einstein A., Podolski B., and Rosen N. (1935): Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete? *Physical Review* **47**, 777–780.
- Hasinger G. (2000): *Das Schicksal des Universums*. Beck, München.

- Heisenberg W. (1935): Ist eine deterministische Ergänzung der Physik möglich? In *Wolfgang Pauli. Wissenschaftlicher Briefwechsel, Band II*, ed. by K. von Meyenn, Springer, Berlin 1985, pp. 409–418.
- Howard D. (2007): Revisiting the Bohr-Einstein dialogue. *Jerusalem Philosophical Quarterly* **56**, 57–90.
- James W. (1890): *The Principles of Psychology, Volume 2*, Holt, New York.
- Kaminski J.A., Sloutsky, and Heckler A.F. (2008): The advantage of abstract examples in learning math. *Science* **320**, 454–455.
- Marcikic I., de Riedmatter H., Tittel W., Zbinden H., and Gisin N. (2003): Long-distance teleportation of qubits at telecommunication wavelengths. *Nature* **421**, 509–513.
- Mermin N.D. (1985): Is the moon there when nobody looks? Reality and the quantum theory. *Physics Today*, April 1985, pp. 38–47.
- Pauli W. (1933): Die allgemeinen Prinzipien der Wellenmechanik. In *Handbuch der Physik, Band XXIV/1*, Springer, Berlin.
- Pauli W. (1948): Brief an Fierz vom 7. Januar 1948. In *Wolfgang Pauli. Wissenschaftlicher Briefwechsel, Band III*, ed. by K. von Meyenn, Springer, Berlin 1993, p. 496f.
- Pauli W. (1952): Der Einfluss archetypischer Vorstellungen auf die Bildung naturwissenschaftlicher Theorien bei Kepler. In *Naturerklärung und Psyche*, ed. by C.G. Jung und W. Pauli, Rascher, Zrich.
- Pauli W. (1954): Brief an Fierz vom 10. August 1954. In *Wolfgang Pauli. Wissenschaftlicher Briefwechsel, Band IV, Teil 2*, ed. by K. von Meyenn, Springer, Berlin 1999, p. 742–747.
- Plaum E. (1992): Bohrs quantentheoretische Naturbeschreibung und die Psychologie. *Psychologie und Geschichte* **3**, 94–101.
- Primas H. (1993): Ein Ganzes, das nicht aus Teilen besteht. In *Neue Horizonte 92/93*, hrsg. von E.P. Fischer, Piper, München, pp. 81–111.
- Primas H. (2007): Non-Boolean descriptions of mind-matter problems. *Mind and Matter* **5**, 7–44.
- Primas H. (2008): Complementarity of mind and matter. In *Recasting Reality. Wolfgang Pauli's Philosophical Ideas and Contemporary Science*, ed. by H. Atmanspacher and H. Primas, Springer, Berlin, pp. 171–209.

- Schrödinger E. (1935): Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik. *Naturwissenschaften* **23**, 807–812, 823–828, 844–849.
- Schwarz N. and Sudman S., eds. (1992): *Context Effects in Social and Psychological Research*, Springer, Berlin.
- Seager W. (2008): A new idea of reality: Pauli on the unity of mind and matter. In *Recasting Reality. Wolfgang Pauli's Philosophical Ideas and Contemporary Science*, ed. by H. Atmanspacher and H. Primas, Springer, Berlin, pp. 83–97.
- Seelig C. (1952): *Albert Einstein und die Schweiz*. Europa Verlag, Zürich.
- Sudarshan E.C.G. (1983): Perception of quantum systems. In *Old and New Questions in Physics, Cosmology, Philosophy, and Theoretical Biology*, ed. by A. van der Merwe, Plenum, New York, pp. 457–467.
- Velmans M. (2008): Psychophysical nature. In *Recasting Reality. Wolfgang Pauli's Philosophical Ideas and Contemporary Science*, ed. by H. Atmanspacher and H. Primas, Springer, Berlin, pp. 115–134.