

Physik und Wirklichkeit – Neuere Entwicklungen zum Einstein-Podolsky-Rosen Paradoxon

ANTON ZEILINGER

1. Einleitung

„Physik und Wirklichkeit“, eine für Viele selbstverständliche Kombination. Ist nicht im Verständnis fast aller Physiker und auch der Öffentlichkeit die Physik diejenige Wissenschaft, die es sich zum Ziel gemacht hat, die Eigenschaften der physikalischen Welt so genau und detailliert wie möglich zu erforschen. Einer Welt, der unausgesprochen, ja fast selbstverständlich Wirklichkeit zuerkannt wird? Das Programm der Physik, das sich auch verkürzt in den beiden operationellen Imperativen „Alles was meßbar ist, messen. Alles, was nicht meßbar ist, meßbar machen“ ausdrücken läßt, und das damit implizit die Existenz einer Wirklichkeit als Referent des Messens anerkennt, hat sich ja auch als außerordentlich fruchtbar erwiesen. Nicht nur, daß wir ihm unsere heutigen detaillierten Kenntnisse von der subatomaren Welt bis hinauf in die Kosmologie verdanken, es geht sogar so weit, daß von Vielen, sicher oft auch relativ unreflektiert, die Physik als eine Art Modellwissenschaft angesehen wird in dem Sinne, daß auch andere Wissenschaften gut beraten wären, sich ebensolcher quantitativer Methoden in Verbindung mit der Verifikation durch das Experiment zu bedienen, wie dies eben das Erfolgsrezept der Physik wurde.

Wie oben bereits erwähnt, ist im Tun des Physikers automatisch die Vorexistenz einer Wirklichkeit angenommen, die es durch das Experiment zu untersuchen gilt. Selbstverständlich kommt es durch die physikalische Untersuchung eines Objektes zu einer Wechselwirkung, das heißt zu einer Rückwirkung auf das Objekt, die im Prinzip zwar berücksichtigt werden müßte, in der Physik großer, sogenannter makroskopischer, Objekte jedoch so klein ist, daß sie keinerlei Bedeutung besitzt. Beobachten wir etwa die Bewegung einer Billardkugel, so wird niemand sich den Kopf darüber zerbrechen, ob das Meßergebnis, also etwa die momentane Position der Kugel, davon abhängt, ob der Billardtisch zum Zwecke der Beobachtung beleuchtet wird oder nicht. Werden die Objekte jedoch sehr klein, so treten wir in einen Bereich ein, in dem diese Wechselwirkung

nicht mehr vernachlässigt werden kann, in dem also die Störung durch die Messung so groß wird, daß wir über den Meßwert keine vernünftige Aussage mehr machen können. Dies tritt etwa in Heisenbergs berühmtem Gedankenexperiment, dem Gammamikroskop, auf, in dem er sich die Frage stellt, wie man die Position etwa eines Elektrons genau messen könnte. Zur Feststellung der Position müssen wir natürlich auch das Elektron beleuchten. Wegen der Quantennatur des Lichtes ist jedoch damit automatisch ein unkontrollierbarer Impulsübertrag verbunden, der wegen der Kleinheit des Elektrons nicht mehr außer acht gelassen werden darf.

Abgesehen von der Bedeutung dieses Gedankenexperimentes für die berühmte Frage der Deutung der Heisenbergschen Unschärfebeziehung kann man jedoch hier noch immer von der Ansicht ausgehen, daß das einzelne Teilchen, in unserem Falle eben ein einzelnes Elektron, vor der Messung selbstverständlich durchaus wohldefinierte Eigenschaften, etwa Ort und Impuls besitzen könne, diese jedoch wegen der Störung des Meßobjektes durch die Beobachtung experimentell nicht zugänglich seien. Daß eine solche Position nicht haltbar ist, hat erst die Diskussion um das Einstein-Podolsky-Rosen (EPR) Paradoxon und die nachfolgenden Entdeckungen, insbesondere die Bell'schen Ungleichungen und das GHZ-Theorem gezeigt.

2. Die Vorgeschichte der Einstein-Podolsky-Rosen Arbeit

Einsteins Beiträge zur Quantentheorie beginnen mit dem Jahr 1905, dem selben Jahr, in dem er auch die Spezielle Relativitätstheorie formulierte. Einstein schlägt vor, den Photoeffekt – die Abtrennung von Elektronen aus Metallen durch auftreffendes Licht – dadurch heuristisch zu beschreiben, daß Licht als aus Energiequanten bestehend angesehen wird. Der dadurch in die Beschreibung des Lichts, das nach damaliger Auffassung als Welle anzusehen war, eintretende Teilchenaspekt wurde von Einstein selbst erst allmählich voll akzeptiert, dauerte es doch immerhin bis 1917 bis, wieder von ihm selbst, diesen Lichtquanten, später Photonen genannt, auch ein, für Teilchen charakteristischer, Impuls zugeordnet wurde. Die experimentelle Bestätigung der Vorhersagen in der Arbeit über den Photoeffekt mündete darin, daß er dafür im Jahr 1922 den Nobelpreis erhielt, obwohl

damals außer ihm nur Wenige das Konzept der Lichtquanten ernst nahmen¹.

Es war wieder Einstein selbst, der sehr früh die Probleme erkannte, die sich aus der Zuschreibung sowohl von Wellen- als auch von Teilcheneigenschaften an das Licht ergeben. So erklärte er etwa 1911 beim Ersten Solvay Kongress „I insist on the provisional character of this concept which does not seem reconcilable with the experimentally verified consequences of the wave theory“ unter Bezug auf das Konzept der Lichtquanten. Jedoch etwa gleichzeitig mit seiner Akzeptanz der Realität der Lichtquanten (ca. 1917) begann er auch sein Unbehagen über die Rolle des Zufalls bei Quantenprozessen auszudrücken. Es ist daher nicht verwunderlich, daß in der Folge die Tatsache, daß die Unbestimmtheit, die in der Entwicklung der „neuen“ Quantenmechanik ab 1925 zu einem Prinzip erhoben wurde, Einstein direkt zu Kritik herausforderte.

Ein wichtiger Schritt war die Formulierung des Konzepts der Komplementarität durch Bohr² und die dabei formulierten Bedingungen der Möglichkeiten von Aussagen über Quantensysteme. Bohr unterstreicht, daß, wie weit auch immer die Phänomene den Bereich der klassischen physikalischen Erklärung übersteigen, die Beschreibung aller Evidenz immer in klassischer Terminologie ihren Ausdruck finden muß. Dies deshalb, weil solche Aussagen nur über Experimente möglich sind, wobei der Ausdruck 'Experiment' sich auf eine Situation bezieht, in der wir anderen mitteilen können, was für Handlungen wir gesetzt haben und was wir daraus gelernt haben. Diese Beschreibung der experimentellen Anordnung und der Beobachtungsergebnisse muß in unzweideutiger Sprache unter geeigneter Verwendung der Terminologie der klassischen Physik erfolgen. Der zentrale Punkt ist nach Bohr nun die „Unmöglichkeit irgendeiner scharfen Trennung zwischen dem Verhalten der atomaren Objekte und der Wechselwirkung mit den Meßinstrumenten, die dazu

¹ Eine historische Darstellung dieser frühen Entwicklungen von Einsteins Denken und der Reaktion seiner Zeitgenossen findet sich bei Abraham Pais *Subtle is the Lord ...*, Oxford University Press, Oxford (1982), die deutsche Übersetzung ist bei Birkhäuser, Basel, erschienen.

² Die entsprechende konzeptive Entwicklung und insbesondere der Bohr-Einstein Dialog wurden niedergeschrieben von Niels Bohr: *Discussions with Einstein on Epistemological Problems in Atomic Physics*. In: *Albert Einstein, Philosopher-Scientist*, P.A. Schilpp ed., *The Library of Living Philosophers*, Evanston (1949).

dienen, die Bedingungen unter denen die Phänomene auftreten zu definieren³. Das Dilemma betreffend die Teilchen- und Welleneigenschaften von Photonen oder Elektronen wird nach Bohr also dadurch aufgelöst, daß es sinnlos ist, von diesen Eigenschaften zu sprechen ohne gleichzeitig die für deren Beobachtung notwendige experimentelle Anordnung voll zu spezifizieren. Da aber experimentelle Anordnungen, die eine genaue raumzeitliche Beschreibung eines Phänomens gestatten, notwendigerweise so gestaltet sind, daß eine gleichzeitige Beschreibung des Energie- und Impulsübertrages nicht möglich ist, und umgekehrt, müssen wir unsere klassische Vorstellung einer detaillierten Beschreibbarkeit des Einzelprozesses aufgeben.

Es war gerade dieser Punkt, der Einstein dazu veranlaßte, mit Hilfe einiger eleganter Gedankenexperimente zu versuchen zu zeigen, daß eine detailliertere Beschreibung sehr wohl möglich ist. Jedesmal jedoch gelang es Bohr durch eine genaue Analyse der experimentellen Anordnungen Einsteins Position zu widerlegen⁴. Diese persönlichen Diskussionen, die anlässlich der Solvay Konferenzen 1927 und 1930 vor allem zwischen Bohr und Einstein stattfanden, wurden durch die Machtergreifung der Nationalsozialisten und durch die Tatsache, daß Einstein sich gezwungen sah, in die USA zu emigrieren, abgebrochen. Die weitere Auseinandersetzung mit Bohr erfolgte dann nur mehr über wissenschaftliche Veröffentlichungen. Am wichtigsten ist dabei eine Arbeit, die Einstein im Jahre 1935 in der amerikanischen Zeitschrift „The Physical Review“ publizierte gemeinsam mit zwei jungen Mitarbeitern: Boris Podolsky und Nathan Rosen. Diese Arbeit hat den bezeichnenden Titel „Can the Quantum Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete?“⁵ zu deutsch: „Kann die quantenmechanische Beschreibung der Wirklichkeit als vollständig angesehen werden?“. Im selben Jahr erschien dann eine Antwort von Bohr⁶ mit dem gleichen Titel. Wir werden im folgenden die wesentlichsten Punkte der Argumentation beider Arbeiten betrachten.⁷

³ Siehe Abraham Pais, loc. cit., pp. 440-449.

⁴ Siehe Niels Bohr, loc. cit., p. 209.

⁵ Albert Einstein, Boris Podolsky and Nathan Rosen: Can the Quantum Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete? *Phys. Rev.* **47**, 777-780 (1935).

⁶ Niels Bohr: Can the Quantum Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete? *Phys. Rev.* **48**, 696-702 (1935).

⁷ Für eine deutsche Übersetzung der wichtigsten Arbeiten siehe: Kurt Baumann und Roman U. Sexl, *Die Deutungen der Quantentheorie*, Vieweg, Braunschweig (1987).

Dabei müssen wir natürlich einige Vereinfachungen machen, den Kern der Problematik jedoch nicht aus den Augen verlieren.

3. Das Einstein-Podolsky-Rosen Paradoxon

Bereits der erste Satz der Einstein-Podolsky-Rosen (EPR) Arbeit beginnt mit einer für Einstein charakteristischen Feststellung: „Jede ernsthafte Betrachtung einer physikalischen Theorie muß die Unterscheidung berücksichtigen zwischen der objektiven Realität, die unabhängig von irgendeiner Theorie ist, und den physikalischen Konzepten mit denen die Theorie operiert. Diese Konzepte sollen der objektiven Realität entsprechen und mit Hilfe dieser Konzepte machen wir uns ein Bild von dieser Realität.“ EPR stellen des weiteren fest, daß der Erfolg einer Theorie davon abhängt, (1), ob sie korrekt ist, d.h. ob ihre Schlüsse mit der menschlichen Erfahrung übereinstimmen, und, (2), ob die durch sie gegebene Beschreibung vollständig ist. Für die Vollständigkeit einer Theorie liefern EPR dann ein notwendiges Kriterium: „Jedes Element der physikalischen Realität muß ein Gegenstück in der physikalischen Theorie haben.“ EPR nennen dies die Vollständigkeitsbedingung. Die Frage nach der Vollständigkeit einer Theorie ist also schnell beantwortet, sobald man entscheiden kann, was die Elemente der physikalischen Realität sind.

Der nun folgende Satz ist offenbar wesentlich durch Einsteins Position einer operationalistisch fundierten Begriffsbildung bestimmt, wie sie ja schon früher in der Auflösung oder zumindest weitestgehenden Modifikation der herkömmlichen Begriffe von Raum und Zeit in der Relativitätstheorie ihren Ausdruck fand: „Die Elemente der physikalischen Realität können nicht festgelegt werden durch a priori philosophische Überlegungen, sondern müssen durch Anrufung der Resultate von Experimenten und Messungen gefunden werden.“ In der Folge geben dann EPR ein hinreichendes, keineswegs notwendiges, Kriterium der Realität: „Falls wir, ohne in irgendeiner Weise ein System zu stören, mit Sicherheit (das ist mit Wahrscheinlichkeit gleich Eins) den Wert einer physikalischen Größe vorhersagen können, dann existiert ein Element der physikalischen Realität, das dieser Größe entspricht.“ Dies ist das berühmte EPR Realitätskriterium.

Es ist lehrreich, dieses EPR Realitätskriterium mit einem Kriterium, das ich als das Realitätskriterium des Alltags bezeichnen möchte, zu vergleichen.

Dieses Kriterium, das wohl weitgehend mit dem Realitätskriterium der klassischen Physik identisch ist, besagt, daß alles, was vorhergesagt oder gemessen werden kann, ein Element der Realität ist. In einfacheren Worten besagt dies, daß die alltäglichen Dinge, die ich beobachtend beschreiben kann, bereits vor und unabhängig von meiner Beobachtung existieren. Hier gilt natürlich eine einfache Beobachtung mit meinen Sinnesorganen genauso als Messung, es benötigt nicht unbedingt irgendwelche komplizierten Meßapparate.

In weiterer Folge diskutieren EPR dann einen spezifischen Fall um zu zeigen, daß die Quantenmechanik unvollständig sei. Im Gegensatz zur bekannten Diskussion um die Unschärferelation, bei der es um Messungen an einem einzelnen Teilchen geht (siehe z.B. das Heisenbergsche Gammamikroskop) ist der wichtige neue Punkt der EPR-Arbeit, daß hier Quantensysteme betrachtet werden, die nicht mehr aus nur einem Teilchen, sondern aus zwei Teilchen bestehen, die miteinander über ihre Vergangenheit in ganz bestimmter Weise verknüpft („korreliert“) sind. Solche Korrelationen gehen auf eine vergangene Wechselwirkung der Teilchen miteinander zurück und können sehr viele verschiedene Formen haben. EPR betrachten den spezifischen Fall, daß die Positionen (x_1, x_2) und die Impulse (p_1, p_2) der Teilchen in der Weise miteinander so zusammenhängen, daß gilt

$$\begin{aligned}x_1 + x_2 &= X_0 \\ p_1 - p_2 &= P_0\end{aligned}$$

Es ist also die Summe X_0 der Positionen der Teilchen und die Differenz P_0 ihrer Impulse exakt festgelegt. Das ist mit der Unschärfebeziehung verträglich, da diese, vereinfacht ausgedrückt, nur vergleichbare Größen zueinander in Beziehung setzt, dies wären etwa die Summe der Positionen mit der Summe der Impulse etc. Ein wichtiger Punkt ist, daß die obigen Beziehungen über die Position oder den Ort der einzelnen Teilchen nichts aussagen, diese sind vollkommen unbestimmt. Festgelegt ist nur, daß wir etwa die Position oder den Ort des zweiten Teilchens sofort genau kennen, sobald wir ein Experiment zur Bestimmung der entsprechenden Größe am ersten Teilchen durchgeführt haben.

Wir wollen nun die Frage untersuchen, welche Experimente man an den einzelnen Teilchen durchführen kann und welche Aussagen dies über das

jeweils andere Teilchen ermöglicht. Nach EPR können wir uns etwa entscheiden, die Position des ersten Teilchens zu messen. Nehmen wir an, unsere Meßapparatur zeigt dafür einen bestimmten Wert, nennen wir diesen Wert X_1 , so wissen wir sofort, daß sich das zweite Teilchen am Ort $X_2 = X_0 - X_1$ befindet. Wir wissen also dann den Ort des zweiten Teilchens sofort ohne daran eine Messung durchgeführt zu haben. Alternativ dazu können wir uns aber auch entscheiden, am ersten Teilchen nicht den Ort sondern den Impuls zu messen, wobei wir einen Wert erhalten, den wir P_1 nennen. In diesem Fall wissen wir sofort, daß das zweite Teilchen den Impuls $P_2 = P_1 - P_0$ besitzt, wieder ohne eine Messung an diesem Teilchen selbst durchgeführt zu haben.

Je nachdem, welche Messung wir am Teilchen 1 durchführen, wissen wir danach Ort oder Impuls des zweiten Teilchens genau. Natürlich können wir wegen der Heisenbergschen Unschärferelation nur eine der beiden Messungen am Teilchen 1 tatsächlich machen. Der wesentliche Punkt der EPR Argumentation ist jedoch der folgende: Zum Zeitpunkt der Messung können die beiden Teilchen im Prinzip beliebig weit voneinander entfernt sein, etwa das eine bei uns auf der Erde und das andere in der Nähe des Sterns Sirius. Die tatsächlichen Eigenschaften des Teilchens 2 müssen nach Meinung von EPR dann unabhängig davon sein, welche Messung wir am weit entfernten Teilchen 1 machen (dies ist die sogenannte Lokalitätsannahme). Durch die Messung lernen wir lediglich etwas über das Teilchenpaar, was wir vor der Messung noch nicht wußten.

Insbesondere muß nach EPR zum Zeitpunkt der Messung für das Teilchen 2 auf Sirius bereits festliegen, daß es die Position X_2 und den Impuls P_2 besitzt, ganz egal, ob wir an Teilchen 1 auf der Erde Ort oder Impuls messen oder ob wir überhaupt eine Messung an diesem Teilchen machen. Andernfalls müßten wir annehmen, daß die Messung an Teilchen 1 instantan das zweite Teilchen beeinflusst. Ort und Impuls jedes Teilchens sind daher intrinsisch festgelegt.

Da die Quantenmechanik eine gleichzeitige Festlegung von Ort und Impuls eines Teilchens nicht gestattet, ist diese Theorie nach EPR unvollständig in dem Sinn, daß sie keine vollständige Beschreibung der Wirklichkeit gestattet. Eine vollständige Beschreibung der Wirklichkeit müßte zumindest alle diejenigen Fälle einschließen, in denen der Wert einer bestimmten Größe vollkommen festgelegt ist wie in unserem Fall nach EPR sowohl Ort als auch Impuls des Teilchens 2.

Den Status eines Paradoxons hat diese Argumentation wohl, allerdings nicht ganz unbestritten, genau wegen dieser Möglichkeit erhalten, zwei verschiedene Größen, die einander nach der Quantenmechanik ausschließen, an einem im Prinzip beliebig weit entfernten Teilchen vorherzusagen. Ein wichtiger Ausgangspunkt für Einsteins Argumentation war der, daß es das Wesen der Physik sei, herauszufinden, was in der Wirklichkeit vorhanden ist. Alle unsere Experimente und Naturbeobachtungen dienen nach dieser Ansicht ausschließlich dazu, etwas an sich in der Wirklichkeit schon vorhandenes zu beobachten.

Diese Position wurde und wird bis heute noch unter Physikern sehr heftig kritisiert. Einstein selbst hat trotz aller Kritik an ihr bis zum Ende seines Lebens festgehalten und hat es immer wieder bedauert, daß sich seine Kritiker nicht wirklich mit seinen Argumenten auseinandergesetzt haben, sondern oft nur ihre eigenen Vorurteile zum Ausdruck brachten. Eine Ausnahme dazu war Bohr, dem Einstein zuerkennt, daß er sich tatsächlich genau mit seinen Ideen auseinandersetzte, obwohl Bohr schließlich zu Schlüssen gelangte, die mit seiner, Einsteins, Position nicht übereinstimmen. Bohr lehnt es ab, über die Wirklichkeit an sich zu sprechen. Für ihn ist Physik wesentlich eine Wissenschaft von den Möglichkeiten der Erkenntnis und jede Frage, die nicht in klarer Weise beantwortbar ist, ist eine sinnlose Frage. In der Physik bedeutet dies, daß eine Frage nur dann sinnvoll ist, wenn es wenigstens im Prinzip möglich ist ein Experiment zu machen, das eine Antwort auf die gestellte Frage zu geben imstande ist.

Für den spezifischen Fall der EPR Argumentation sagt Bohr in der erwähnten Arbeit, die den gleichen Titel trägt wie die Einsteins, daß die beiden Teilchen, wie weit sie auch voneinander getrennt sein mögen, immer eine Einheit bilden. Daher werden die über das Teilchen 2 möglichen Vorhersagen (und nur um die geht es Bohr und nicht darum was „wirklich“ ist) davon abhängig sein, welches Experiment am Teilchen 1 tatsächlich ausgeführt wird. Die Frage, was die Eigenschaften des Teilchens 2 an und für sich seien, stellt sich Bohr nicht. Bohr lehnt also einige Punkte in Einsteins Bild rundweg ab. Dies ist zum ersten die Lokalitätsannahme und zum zweiten die Annahme, daß es sinnvoll sei, über Eigenschaften der Wirklichkeit unabhängig von einem spezifisch und explizit definierten Experiment überhaupt zu sprechen.

Sieht man sich die EPR Arbeit genau an, so muß man zugeben, daß die Ausgangspunkte der gewählten Argumentation durchaus vernünftig sind

und daß daher die Schlußfolgerung, die Quantenmechanik sei eine unvollständige Beschreibung der Natur, logisch akzeptabel ist. Gerade in diesem Punkt ist Einstein sicher von seinen Zeitgenossen und von der Nachwelt Unrecht getan worden. Nach Einstein ist die Frage, ob die Quantenmechanik eine vollständige Theorie sei, bereits eindeutig negativ zu beantworten. Die offene Frage ist dann die, ob eine vollständigere Theorie, eine vollständigere Beschreibung möglich ist.

Man kann sich eine vollständigere Beschreibung etwa in Analogie zur Situation in der Thermodynamik vorstellen. Dort sind Größen wie etwa Temperatur, Druck oder Entropie nur mittlere Größen eines Ensembles von vielen Teilchen. Die vollständigere Theorie ist hier die vor allem von Boltzmann geschaffene Statistische Mechanik. In Analogie wären die quantenmechanischen Unschärfen dann vielleicht nur die Konsequenz der Tatsache, daß jedes Experiment notwendigerweise über Ensembles von vielen Einzelteilchen mittelt. Eine vollständigere Theorie sollte dann eine detailliertere, über die durch die Heisenbergsche Unschärfebeziehung gegebenen Grenzen hinausgehende Beschreibung ermöglichen.

EPR sprechen am Ende ihrer Arbeit die Vermutung aus, daß eine solche Beschreibung möglich sei. Von dieser Vermutung wissen wir heute, daß sie inkorrekt ist.

Die EPR-Argumentation ruht also auf vier Pfeilern: 1. Eine Definition für die Vollständigkeit einer Theorie, 2. einem Realitätskriterium, 3. einem Lokalisierungsprinzip und 4. der Annahme, daß die in der Argumentation verwendeten Vorhersagen der Quantenmechanik korrekt sind.

Die weitere Diskussion der EPR Arbeit in der Literatur ist eine wohl einmalige Abfolge von Mißverständnissen, die vielleicht schon durch die Formulierungen in der Arbeit selbst zumindest zum Teil begünstigt wurden. So klagt Einstein in einem Brief an Schrödinger, daß die Arbeit aus Sprachgründen von Podolsky verfaßt wurde, daß jedoch der wesentliche Punkt unter zuviel „Gelehrsamkeit“ begraben wurde⁸.

Einstein selbst hat an seiner Überzeugung, daß die Quantenmechanik keine vollständige Theorie sei, bis zum Ende seines Lebens festgehalten. Als charakteristisches und vielleicht sogar klareres Beispiel als die EPR Arbeit seien hier seine Autobiographischen Notizen⁹ erwähnt. Einstein stellt hier

⁸ Brief Albert Einstein an Erwin Schrödinger vom 28.8.1935.

⁹ Albert Einstein: Autobiographisches. In: *Albert Einstein, Philosopher-Scientist*, P.A. Schilpp ed., The Library of Living Philosophers, Evanston (1949).

fest, daß, je nachdem welche Messung wir am System 1 durchführen, wir dem System 2 verschiedene Wellenfunktionen zuordnen müssen. „Aber an einer Annahme sollten wir nach meiner Ansicht unbedingt festhalten: der reale Sachverhalt (Zustand) des Systems S_2 ist unabhängig davon, was mit dem von ihm räumlich getrennten System S_1 vorgenommen wird. Je nach Art der Messung, welche ich an S_1 vornehme, bekomme ich aber ein andersartiges ψ_2 für das zweite Teilsystem. Nun muß aber der Realzustand von S_2 unabhängig davon sein, was mit S_1 geschieht.“ Daraus folgt für Einstein, daß die Wellenfunktion keine vollständige Beschreibung des realen Sachverhalts sein kann, da es ja dann unmöglich sein müßte, demselben realen Sachverhalt zwei verschiedene Wellenfunktionen zuzuordnen.

Es ist zu bedauern, daß Einstein nicht lange genug lebte, um Stellung nehmen zu können zu Bells Demonstration, daß nämlich eine auf dem Realitätsprinzip und auf dem Lokalitätsprinzip beruhende vollständigere Theorie im Widerspruch zur Quantenmechanik steht. Noch verblüffender wäre für Einstein wahrscheinlich die durch das GHZ-Theorem gezeigte Inkonsistenz der Ausgangspunkte der EPR Argumentation gewesen. Wir werden uns im nächsten Kapitel zuerst mit den wesentlichen Zügen des Beitrages von Bell¹⁰ befassen.

4. Die Bell'sche Ungleichung

Wir wollen hier zuerst eine spezifische Form der Bell'schen Ungleichung diskutieren. In einer einfachen Herleitung der Bell'schen Ungleichung betrachtet man Ensembles von Teilchen, Dingen, Gegenständen, die jeder nach zumindest drei dichotomen Eigenschaften kategorisiert werden können. Unter einer dichotomen Eigenschaft versteht man eine Eigenschaft, die so beschaffen ist, daß sie das einzelne Mitglied des Ensembles entweder besitzt, oder nicht besitzt. Dichotome Eigenschaften von Menschen sind etwa die, Brillenträger zu sein oder nicht, oder größer als 1.70 m zu sein oder nicht, oder weiblichen Geschlechts zu sein oder nicht.

¹⁰ John S. Bell: On the Einstein Podolsky Rosen Paradox. *Physics* (NY) 1, 195–200 (1964). Abgedruckt in J.S. Bell, *Speakable and Unsayable in Quantum Mechanics* Cambridge University Press, Cambridge (1987).

Wir bezeichnen die drei Eigenschaften, die wir zur Charakterisierung auswählen, ganz allgemein mit A, B und C und können dann folgenden Satz formulieren:

In einer beliebigen Population ist die Anzahl der Mitglieder der Population, die sowohl Eigenschaft A als auch Eigenschaft B besitzen, geringer oder gleich der Summe aus der Anzahl der Mitglieder, die sowohl Eigenschaft A als auch Eigenschaft C besitzen, und der Anzahl der Mitglieder, die wohl Eigenschaft B, jedoch nicht Eigenschaft C besitzen.

Von der Gültigkeit dieses Satzes kann man sich leicht überzeugen, wenn man die Zerlegung der genannten Mengen in ihre Teilmengen verwendet. So ist etwa die Anzahl der Mitglieder der Population, die sowohl Eigenschaft A als auch Eigenschaft B besitzen gleich der Summe aus der Anzahl der Mitglieder, die alle drei Eigenschaften A, B und C besitzen und aus der Anzahl der Mitglieder, die zwar Eigenschaften A und B besitzen, nicht jedoch die Eigenschaft C. Letztendlich möchten wir Aussagen der eben gemachten Art auf Beobachtungen in der Quantenmechanik anwenden. Dazu müssen wir zuerst unsere Aussage auf statistische Ensembles ausweiten, das heißt, daß wir nicht alle Mitglieder eines Ensembles auf ihre dichotomen Eigenschaften untersuchen, sondern so große Teilmengen, daß das Grundgesetz der empirischen Statistik, das Gesetz der großen Zahl, anwendbar ist. In der Quantenphysik haben wir ferner das Problem, daß man einander auf Grund der Unschärferelation ausschließende Eigenschaften an einem einzelnen System nicht gleichzeitig beobachten kann, man also an einem einzelnen Teilchen nur eine Messung durchführen kann. Um trotzdem noch weitere Aussagen machen zu können, haben ja Einstein, Podolsky und Rosen Paare betrachtet, die aus zwei korrelierten Teilchen bestehen. Ein noch einfacherer Fall als der von EPR untersuchte resultiert, wenn wir Paare betrachten, die aus zwei Teilchen mit vollkommen identischen Eigenschaften bestehen. Wir überlegen uns dann, was wir über die statistische Verteilung der Meßergebnisse an Teilchenpaaren aussagen können. Wenn wir also zum Beispiel durch Messung an Teilchen 1 feststellen, daß es die dichotome Eigenschaft A besitzt, dann wissen wir, wegen der Identität der beiden Teilchen, daß auch Teilchen 2 diese Eigenschaft besitzt. Wir können dies jederzeit dadurch feststellen, daß wir an Teilchen 2 dieselbe Messung durchführen.

Konzentrieren wir uns jedoch nun auf solche Messungen, bei denen wir an den beiden Teilchenpaaren das Vorliegen verschiedener dichotomer Eigenschaften untersuchen etwa Eigenschaft B an Teilchen 1 und Eigenschaft C an Teilchen 2. Wir machen entsprechend dem Gesetz der großen Zahl unsere verschiedenen Messungen an hinreichend großen, jedoch gleich großen Teilmengen. Es gilt dann die

Bell'sche Ungleichung

Die Anzahl derjenigen Paare in einer hinreichend großen Teilmenge, von denen ein Mitglied die Eigenschaft A und das andere Mitglied die Eigenschaft B besitzt, ist geringer oder gleich der Summe aus der Anzahl der Paare in einer gleich großen Teilmenge, von denen ein Mitglied die Eigenschaft A und das andere Mitglied die Eigenschaft C besitzt, und aus der Anzahl der Paare in einer wieder gleich großen Teilmenge, von denen ein Mitglied die Eigenschaft B, das andere Mitglied jedoch nicht die Eigenschaft C besitzt.

Es ist erstaunlich, daß ein so unscheinbarer und in gewissem Sinn trivialer Satz von so zentraler Bedeutung für die moderne Physik geworden ist. Hätten etwa die Griechischen Philosophen überhaupt an die Möglichkeit gedacht, daß es einmal Probleme mit der Zuordnung von Eigenschaften an Ensembles geben könnte, sie hätten sicherlich die Bell'sche Ungleichung als eine notwendige Bedingung formuliert. Damit will ich ausdrücken, daß die Bell'sche Ungleichung selbst unabhängig von der Quantentheorie formuliert werden kann, so wie wir es oben ja auch tatsächlich durchgeführt haben. Für alle Beobachtungen, bei denen die Quantenmechanik keine Rolle spielt, werden wir feststellen, daß die Bell'sche Ungleichung erfüllt ist.

Es erhebt sich also nun die Frage, ob die Bell'sche Ungleichung von der Natur tatsächlich immer eingehalten wird. Davon unabhängig ist die Frage, ob die Vorhersagen der Quantenmechanik für Messungen an Teilchenpaaren mit der Bell'schen Ungleichung in Einklang zu bringen sind. Es stellt sich nun heraus, daß es tatsächlich experimentelle Fälle gibt, in denen die Bell'sche Ungleichung verletzt ist. Dies ist sicherlich in gewisser Weise überraschend, da die zur Herleitung gemachten Annahmen ja minimal waren. Schön ist jedoch, daß wir dennoch eine Theorie zur Verfügung haben, die trotzdem funktioniert, eben die Quantentheorie.

Bei der Untersuchung der Gründe für die Verletzung der Bell'schen Ungleichung haben wir uns vor Augen zu halten, daß in ihre Herleitung genau die Annahmen, die EPR getroffen haben, einfließen. Insbesondere wurde angenommen, daß die EPR Elemente der Realität zumindest in den Fällen, in denen eine Vorhersage mit Sicherheit gemacht werden kann, tatsächlich existieren, ihre Anwendung auf Fälle statistischer Korrelationen führt dann zum Widerspruch. Ehe wir in eine Analyse der möglichen Konsequenzen der Verletzung der Bell'schen Ungleichung eintreten, wenden wir uns neueren Entwicklungen zu, nach denen die Elemente der Realität nicht einmal in Fällen perfekter Korrelationen als existent angenommen werden können.

5. Das GHZ Theorem

Kürzlich wurde in Zusammenarbeit mit Greenberger und Horne¹¹ bei der Untersuchung der Korrelationen zwischen drei Teilchen gefunden, daß es noch schärfere Widersprüche zwischen den Prämissen der EPR Arbeit und der Quantenmechanik gibt, als dies bei der Bell'schen Ungleichung der Fall ist. Der Widerspruch läßt sich am besten an Hand des folgenden Gedankenexperimentes erläutern.

Nehmen wir an, wir hätten drei Meßapparate; 1, 2, 3, und jeder dieser Apparate sei mit einem Schalter ausgestattet. Jeder Schalter habe nur zwei mögliche Schalterstellungen, die wir mit „O“ und mit „U“ bezeichnen wollen. Es sei jeder der drei Meßapparate mit zwei Anzeigelämpchen ausgestattet, einem roten („R“) und einem grünen („G“). Ferner nehmen wir an, wir hätten eine Quelle, die so beschaffen sei, daß sie immer gleichzeitig drei Teilchen, also ein Teilchentriplett, aussendet. Wir ordnen unser Experiment so an, daß je eines der drei von der Quelle ausgesandten Teilchen in je einen der drei Apparate eintritt, worauf eines der beiden Lämpchen aufleuchtet, entweder das rote oder das grüne. Aufleuchten des

¹¹ D.M. Greenberger, M.A. Horne and A. Zeilinger: Going beyond Bell's Theorem. In: *Bell's Theorem, Quantum Theory and Conceptions of the Universe*, M. Kafatos, Ed., Kluwer, Dordrecht (1989), pp. 73-76; und D.M. Greenberger, M.A. Horne, A. Shimony and A. Zeilinger: Bell's theorem without inequalities. *Am. J. Phys.* **58**, 1131 (1990).

grünen Lämpchens bedeutet, daß die durch den Apparat gemessene Eigenschaft vorliegt, rot bedeutet, daß sie nicht vorliegt. Der Einfachheit halber, dies ist jedoch keineswegs essentiell, nehmen wir noch an, daß die drei Apparate gleich weit von der Quelle entfernt sind. Beobachten wir nun unsere Anordnung für einige Zeit.

Zuerst bemerken wir, daß, solange wir nur einen Apparat beobachten, die Meßergebnisse, das Aufleuchten der roten oder grünen Lämpchen rein statistisch verteilt ist. Das rote und das grüne Lämpchen leuchten an jedem Apparat etwa gleich oft auf. Wir erhalten also eine Meßreihe etwa der folgenden Art

R, G, G, R, G, R, G, G, R, R, G, R, R, R, ...

also eine statistische Verteilung ohne irgendeine Struktur und unabhängig davon, ob wir den Schalter am jeweiligen Apparat in die Stellung „O“ oder „U“ bringen.

Also untersuchen wir als Nächstes, ob ein Zusammenhang besteht zwischen dem Aufleuchten der Lämpchen an Apparat 1 und dem Aufleuchten der Lämpchen etwa an Apparat 2. In unserem Dreiteilchenfall werden wir sehen, daß es keinerlei Zusammenhang zwischen den Meßergebnissen an zwei Apparaten gibt. Es werden also an beiden Apparaten etwa gleich oft das rote und das grüne Lämpchen aufleuchten, und es gibt keinerlei Korrelationen oder Antikorrelationen, gleichgültig welche Schalterstellungen wir wählen. Es treten also alle Farbkombinationen gleich oft auf, es ist zum Beispiel das Aufleuchten des roten Lämpchens an Apparat 1 gleich oft mit dem Aufleuchten des roten wie des grünen Lämpchens an Apparat 2 verbunden.

Wenden wir uns also der Untersuchung der Frage zu, ob überhaupt und gegebenenfalls welche Zusammenhänge es beim gleichzeitigen Aufleuchten der Lämpchen an allen drei verschiedenen Apparaten gibt. Jetzt wird die Untersuchung natürlich komplizierter, da wir ja 3 Apparate haben, jeder mit zwei verschiedenen Schalterstellungen, also insgesamt 8 verschiedene Kombinationen. Für unsere Untersuchungen reicht es jedoch, wenn wir uns zuerst einmal auf die Fälle beschränken, in denen einer der Schalter auf „O“ steht und die beiden anderen auf „U“. Zum Beispiel der Schalter an

Apparat 1 auf „O“ und die Schalter an den Apparaten 2 und 3 beide auf „U“. Wir beobachten dann Meßreihen der folgenden Art

$$\begin{bmatrix} G \\ R \\ G \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} R \\ G \\ G \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} G \\ G \\ R \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} G \\ R \\ G \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} R \\ R \\ R \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} R \\ G \\ G \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} G \\ R \\ G \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} R \\ R \\ R \end{bmatrix} \dots$$

Jede Klammer faßt die drei Meßergebnisse an einem Teilchenpaar zusammen. So bedeutet etwa die erste Klammer, daß für das erste gemessenen Teilchentripel an Apparat 2 das rote Lämpchen aufgeleuchtet hat und an den beiden anderen Apparaten das grüne. Betrachten wir unsere Meßreihe, so sehen wir in Übereinstimmung mit unserer früheren Beobachtung, daß die Folge der Meßergebnisse etwa an einem einzelnen Apparat keine besondere Struktur aufweist.

Natürlich müssen wir, um eine solche Aussage machen zu können, tatsächlich viel längere Meßreihen untersuchen. Betrachten wir jedoch alle drei Lämpchen gemeinsam, so sehen wir in unserem Fall, daß entweder alle drei roten Lämpchen gemeinsam aufleuchten oder nur ein rotes und zwei grüne.

Die gleiche Beobachtung machen wir, wenn wir Schalter 2 oder 3 in Stellung „O“ bringen und die beiden anderen in Stellung „U“. Es kommt also in dem Fall, daß einer und nur einer der drei Schalter in der Stellung „O“ ist, nie vor, daß alle drei grünen Lämpchen aufleuchten oder ein grünes und zwei rote.

Dies bedeutet, daß ich bei diesen Schalterstellungen mit Sicherheit sagen kann, was das Meßergebnis für ein Teilchen sein wird, sobald ich die Meßergebnisse für die zwei anderen Teilchen kenne. Sind die Meßergebnisse für die ersten beiden Teilchen beide gleich, so leuchtet am dritten Apparat ja mit Sicherheit das rote Lämpchen auf, sonst das grüne. Es muß also gemäß dem EPR Realitätskriterium das Ergebnis der Messung an jedem der drei Teilchen einem Element der Realität entsprechen. Gemäß der EPR Lokalitätsannahme muß dies auch unabhängig davon sein, welche der Messungen ich an den anderen beiden Teilchen mache, ja sogar unabhängig davon, ob ich an den anderen Teilchen überhaupt eine Messung durchführe. Die drei Messungen können ja beliebig weit voneinander entfernt sein und es wäre entsprechend der EPR Lokalitätshypothese unverständlich, wenn meine freie Entscheidung, welches Experiment ich hier in meinem

Labor etwa an Teilchen 1 mache, das Ergebnis der Messung an Teilchen 2, die ein Kollege von mir gerade jetzt auf Sirius durchführt, beeinflussen würde.

Überlegen wir uns nun die Frage, welche Resultate wir bei anderen Schalterstellungen erwarten. Die Frage ist insofern sinnvoll, da wir uns ja eben davon überzeugt haben, daß es bei jeder Schalterstellung für jedes einzelne Teilchen ein wohldefiniertes Meßresultat gibt, also offenbar in irgendeiner Weise festliegt, ob das rote oder das grüne Lämpchen aufleuchtet.

Betrachten wir zum Beispiel alle jene Teilcentriplets, die das zweite Resultat der obigen Liste ergeben, also bei den Schalterstellungen „O“ am ersten Apparat das Resultat „R“, bei „U“ am zweiten Apparat das Resultat „G“ und bei „U“ am dritten Apparat wieder das Resultat „G“. Wir schreiben dies in Form einer kleinen Tabelle:

Schalterstellung	„O“ „U“	
Maßresultat an		
Apparat 1	R	?
Apparat 2	?	G
Apparat 3	?	G

In der ersten Spalte stehen hier die Ergebnisse für die Schalterstellung „O“ und in der zweiten Spalte die Ergebnisse für die Schalterstellung „U“. Die uns bekannten Meßergebnisse haben wir bereits in dieser Tabelle eingetragen. Uns interessiert jetzt die Frage, welches Resultat wir für dieses spezifische Zahlentripel an Apparat 1 erhalten hätten, wenn die Schalterstellung dort nicht „O“ sondern „U“ gewesen wäre. Dieses und die anderen beiden entsprechenden Resultate sind uns natürlich unbekannt, daher die Fragezeichen in der Liste.

Die Frage, welches Resultat wir für diese Teilchen bei anderen Schalterstellungen erhalten hätten, scheint jedoch, zumindest auf erste Sicht, durchaus legitim zu sein. Es gäbe im Prinzip eine ganze Menge Möglichkeiten, die Fragezeichen auszufüllen, jedoch erinnern wir uns daran, daß für den Fall eines Schalters auf „O“ und der beiden anderen Schalter auf „U“ die experimentelle Beobachtung ist, daß entweder alle 3 roten Lämpchen leuchten oder 1 rotes und 2 grüne. Der Leser kann sich mit ein

wenig Nachdenken selbst überzeugen, daß es daher nur zwei Möglichkeiten, die obige Tabelle zu vervollständigen gibt: Entweder

Schalterstellung	„O“	„U“
Maßresultat an		
Apparat 1	R	G
Apparat 2	R	G
Apparat 3	R	G

Oder

Schalterstellung	„O“	„U“
Maßresultat an		
Apparat 1	R	R
Apparat 2	G	G
Apparat 3	G	G

Ähnliche Resultate erhalten wir, falls wir die anderen Fälle der weiter oben angegebenen Resultatenliste für die Schalterstellungen O-U-U untersuchen. Das alles ist eine reine Denksportaufgabe und hat noch nichts spezifisch mit Physik zu tun. Es ist dem Leser zu empfehlen, sich diese Möglichkeiten in Ruhe durchzudenken.

Wohin führt das Ganze? Dazu überlegen wir uns ganz einfach, welche Lämpchen an unseren Apparaten aufleuchten würden, wenn wir uns entscheiden sollten alle 3 Schalter auf „O“ zu stellen. Wir können aus unseren Tabellen ablesen, daß es nur zwei mögliche Kombinationen für die Meßergebnisse gibt. Entweder leuchten alle drei roten Lämpchen auf oder ein rotes und zwei grüne. Wenn der Leser sich tatsächlich zu Hause der kleinen Denksportaufgabe widmet, wird er sehen, daß dies alle Möglichkeiten einschließt.

In anderen Worten ausgedrückt sagt unser Modell für den Fall, daß alle drei Schalter in Position „O“ stehen, auch hier wieder voraus, daß wir, sobald wir die Meßresultate von zweien der Apparate kennen, wieder das Resultat

für den dritten exakt vorhersagen können. Sind die beiden ersten Lämpchen gleich, erwarten wir, daß am dritten Apparat das rote Lämpchen aufleuchtet, sind sie verschieden, das grüne.

Wie gemäß der naturwissenschaftlichen Methode üblich, müssen wir die theoretische Vorhersage, die wir soeben gewonnen haben, mit dem Experiment vergleichen. Und es ist selbstverständlich eine theoretische Vorhersage, da wir sie durch eine einfache und klare Gedankenkette erhalten haben. Daß wir dazu keine umfangreiche Mathematik zur Hilfe nehmen mußten, ist nebensächlich. Aus technischen Gründen kann das Experiment selbst derzeit noch nicht gemacht werden, einige Laboratorien arbeiten allerdings schon daran. Wir können daher unsere theoretische Vorhersage mit der der Quantenmechanik vergleichen und uns darauf verlassen, daß die Quantenmechanik bisher in allen Experimenten ganz ausgezeichnet bestätigt wurde, also zu erwarten ist, daß dies auch in den neuen Experimenten der Fall sein wird.

Das von der Quantentheorie her zu erwartende Resultat hängt natürlich von den Eigenschaften der Quelle und davon ab, welchen physikalischen Eigenschaften der von der Quelle ausgesandten Teilchentriplets die Schalterstellungen entsprechen. Wieder beschränken wir uns auf dichotome Eigenschaften und das Aufleuchten des grünen Lämpchens bedeute dann etwa, daß die ausgesuchte Eigenschaft an dem gerade gemessenen Teilchen vorliegt, rot bedeutet, daß sie nicht vorliegt. Es gibt nun verschiedene Möglichkeiten, und den interessierten Leser verweise ich auf die einschlägigen physikalischen Veröffentlichungen¹², das oben gegebene Gedankenexperiment so zu realisieren, daß folgendes auftritt: Für den Fall, daß die Schalterstellungen so ausgewählt werden, daß nur ein Schalter auf „O“ und die beiden anderen Schalter auf „U“ eingestellt sind, erhalten wir genau die durch die beiden obigen Tabellen gegebenen Möglichkeiten. Wir können also unsere obigen Tabellen benutzen, um Vorhersagen für andere Schalterstellungen zu erhalten, so zum Beispiel für den Fall, daß alle drei Schalter auf „O“ sind. Tun wir dies dann tatsächlich in unserem Experiment, so erwarten wir nach der Quantenmechanik das genaue Gegenteil der Vorhersage unseres Modells. Die aus unserem Modell

¹² Siehe die oben zitierten Arbeiten von Greenberger et al. sowie N.D. Mermin: What's wrong with these elements of reality. *Physics today* 43 1(6), 9-11 (1990) und N.D. Mermin: Quantum mysteries revisited. *Am. J. Phys.* 58, 731-734 (1990).

vorhergesagten Möglichkeiten, nämlich daß entweder alle 3 roten Lämpchen aufleuchten oder nur ein rotes mit zwei grünen treten nie auf. Dagegen leuchten entweder alle drei grünen Lämpchen auf oder ein grünes und zwei rote.

Wieder in anderen Worten ausgedrückt: Nehmen wir an, wir hätten alle drei Schalter auf „O“ gestellt. Dann werden wir, sobald wir die Resultate von zweien der Apparate wissen, vorhersagen, welches Resultat wir für den dritten Apparat erwarten. Dies tun wir durch unsere kleine Denksportaufgabe. Sehen wir jedoch nach, welches Resultat wir tatsächlich am dritten Apparat erhalten, müssen wir feststellen, daß dort genau das Gegenteil auftritt. Sagen wir voraus, daß das rote Lämpchen leuchten wird, beobachten wir tatsächlich das grüne und umgekehrt.

Dies ist äußerst bemerkenswert und im nächsten Kapitel werden wir uns einer Analyse dieses Resultats zuwenden.

6. Die Konsequenzen

Diskrepanzen dieser Art sind in der Geschichte der Naturwissenschaften immer wieder aufgetreten, meist haben sie dann zu einer Verbesserung unserer Ideen über die Welt geführt, also zu neuen physikalischen Theorien. Wir haben es hier jedoch mit einer völlig neuen Situation zu tun. Wir haben ja schon eine Theorie, nämlich die Quantenmechanik, die die richtigen Ergebnisse liefert. Auf ersten Blick gäbe es also keinerlei Grund, sich besonders zu wundern, da ja nur ein Widerspruch zu unserem offenbar zu naïven Modell besteht. Das Problem ist jedoch, daß unser Modell extrem einfach ist. Die wenigen Annahmen, die in das Modell eingeflossen sind, sind so fundamental, daß sie in unserem alltäglichen wissenschaftlichen Tun, ja sogar im Alltag selbst als selbstverständlich angenommen und akzeptiert werden.

Rekapitulieren wir nochmals unsere Argumentationskette: Wir haben eine Serie von Experimenten durchgeführt, natürlich nur als Gedankenexperimente, bei denen wir beobachtet haben, daß zwischen drei Teilchen sehr starke Korrelationen bestehen. Diese Korrelationen sind so stark, daß wir, sobald wir die Meßresultate für zwei Teilchen kennen, mit Sicherheit das Resultat für das dritte vorhersagen können. Entscheiden wir uns

jedoch, an den ersten beiden Teilchen andere Eigenschaften, als die ursprünglich beabsichtigten zu messen, erhalten wir für das dritte Teilchen genau das gegenteilige Resultat, als das, das wir auf Grund unserer vorherigen Messungen erwarten würden.

In diese Überlegungen sind also folgende Annahmen eingegangen:

1. Die EPR Realitätsannahme in der Form, daß wir sagen, daß das Teilchen bestimmte wohldefinierte Eigenschaften haben muß, da ich ja die Ergebnisse bestimmter Experimente mit Sicherheit vorhersagen kann.
2. Die EPR Lokalitätsannahme in dem Sinne, daß wir fordern, daß die Eigenschaften von Teilchen 3 nicht davon beeinflußt werden dürfen, welche Eigenschaft an Teilchen 1 und 2 einer Messung unterworfen wird.¹³
3. Die Annahme, daß die Vorhersagen der Quantenmechanik für unser Dreiteilchensystem korrekt sind.
4. Die Annahme der kontrafaktischen Bestimmtheit. Dies ist die Annahme, daß es möglich und sinnvoll ist, Resultate durchgeführter Experimente und Beobachtungen heranzuziehen, um Aussagen über die Ergebnisse alternativer, nicht durchgeführter Experimente zu gewinnen.
5. Die Annahme, daß die Anwendung der Aristotelischen Logik zu richtigen Resultaten führt.

Zumindest eine dieser Annahmen muß unrichtig sein, um den aufgezeigten Widerspruch beseitigen zu können. Dazu möchte ich jetzt noch eine kurze Analyse dieser Möglichkeiten geben und vor allem die jeweiligen Probleme aufzeigen:

1. Aufgabe des EPR Realitätskriteriums: Wenn nicht einmal in denjenigen Fällen, in denen eine Vorhersage mit Sicherheit gemacht werden kann, ein Element der Wirklichkeit in der Natur vorliegt, was ist dann der Referent menschlichen Handelns in der Welt und naturwissenschaftlichen Tuns?
2. Aufgabe des Lokalitätsprinzips: Die Annahme, daß das Handeln des Experimentators hic et nunc Eigenschaften im Prinzip beliebig weit entfernter Systeme oder Objekte instantan ändern kann, erfordert zumindest eine radikale Revision unserer Vorstellungen von Raum und Zeit.
3. Die Quantenmechanik hat sich als die wahrscheinlich am genauesten

¹³ Die 3 Teilchen können ja beliebig weit voneinander entfernt sein. Selbstverständlich sind Korrelationen, die aus der gemeinsamen Vergangenheit der Teilchen stammen, zugelassen, würden jedoch nicht ausreichen, die obigen Resultate zu erklären, solange man annimmt, daß die Korrelation Zusammenhänge zwischen Eigenschaften beschreiben, die die Teilchen tatsächlich besitzen.

und umfangreichsten bestätigte physikalische Theorie erwiesen. Es wäre sehr unwahrscheinlich, daß sie gerade bei korrelierten Mehrteilchensystemen zusammenbrechen sollte.

4. Die kontrafaktische Bestimmtheit ist sicherlich ein für unser alltägliches Tun und insbesondere für die Tätigkeit als Naturwissenschaftler von zentraler Bedeutung. Insbesondere für jedes Planen sind Überlegungen der Form „Was geschähe, wenn....“ unentbehrlich.

5. Ein Zusammenbruch der Gültigkeit der Aristotelischen Logik ist von einigen Autoren vorgeschlagen worden. Es erscheint dieser Weg jedoch unbefriedigend, da diese Logik auf der Metaebene, auf der über die Richtigkeit einer Theorie entschieden wird, immer noch herangezogen werden muß.

Darüberhinaus gibt es noch einige weitere Vorschläge, von denen ich der Vollständigkeit halber nur zwei noch erwähnen möchte. Eine im Prinzip denkbare Möglichkeit wäre die Annahme eines vollständig deterministischen Universums. Abgesehen von der allgemeinen philosophischen Problematik einer deterministischen Welt sei hier nur bemerkt, daß das Fragestellen an die Natur mit Hilfe von frei entworfenen Experimenten ein Eckpfeiler der modernen Naturwissenschaft ist und bei Annahme eines totalen Determinismus eine Argumentation wie die obige, die von der freien Wählbarkeit der Versuchsanordnung ausgeht, inkonsistent würde.

Eine andere Möglichkeit ist die Annahme, daß es auch retroaktive Wirkungszusammenhänge in der Physik gibt, daß also von den Meßapparaten zurück zur Quelle und damit zurück in die Vergangenheit Information über die gewählte Versuchsanordnung übermittelt wird. Dieser Vorschlag ist innerhalb der allgemeinen Kategorie derjenigen Ansichten zu sehen, die eine Änderung der Struktur unserer Raumzeit als Konsequenz des EPR Paradoxons ins Auge fassen.

Es sei zum Abschluß erwähnt, daß die Mehrheit der Physiker die Ansicht vertritt, das Einstein-Podolsky-Rosen Paradoxon sei ein Hinweis auf Nichtlokalität in der Quantenmechanik. Es ist nicht verwunderlich, daß von all den oben erwähnten Möglichkeiten die Physiker diese vorziehen, da sie zumindest vordergründig die am wenigsten radikale Änderung des physikalischen Weltbildes nach sich ziehen würde. Insbesondere würde dann die Annahme – so manche meinen die Fiktion – einer unabhängig von unserem Tun existierenden Welt erhalten werden, einer Welt, deren Eigenschaften zu finden dann eben die Aufgabe der Naturwissenschaften wäre.

Es ist jedoch durchaus möglich und nach Meinung des gegenwärtigen Autors durchaus wahrscheinlich, daß die Konsequenzen des EPR Paradoxons zu einer weitaus radikaleren Revision unseres naturwissenschaftlichen Weltbildes führen werden. Ansätze dazu müßten davon ausgehen, daß jedes Beobachten, jedes Messen, jedes Experimentieren zuerst die Frage des richtigen Ordners von Information stellt und erst in zweiter Linie die Frage nach dem Referenten der Information. Es sei gestattet, mit einem Appell zu schließen, die verschiedenen heute vor uns liegenden möglichen Konsequenzen aus der Einstein-Podolsky-Rosen Situation zumindest vorläufig nebeneinander bestehen zu lassen und insbesondere all diese Möglichkeiten daraufhin zu untersuchen, welche sonstigen Konsequenzen sich aus ihnen ergeben würden. Daß dies einer intensiven Zusammenarbeit von Physikern und Philosophen bedarf, ist evident.

Wenn auch Einstein, Podolsky und Rosen in ihrer Argumentation, wie wir heute wissen, inkonsistent waren, wurde durch ihre Arbeit und durch Einsteins früheres und späteres Denken in dieser Richtung eine der wahrscheinlich tiefsten Fragen der modernen Naturwissenschaften gestellt. Ihre Beantwortung ist bis heute ausständig.

DANKSAGUNG

Die Arbeiten des Autors zu den Grundlagen der Quantenmechanik wurden vom österreichischen Fonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung, Projekte Nr. S 42-01 und P 6635 und von der U.S. National Science Foundation (Grants No. DMR 87-13559 und INT 87-13341) unterstützt.

LITERATUR:

Albert Einstein, Boris Podolsky and Nathan Rosen:

Can the Quantum Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete?
Phys. Rev. **47**, 777-780 (1935).

Niels Bohr:

Can the Quantum Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete? *Phys. Rev.* **48**, 696-702 (1935).

Albert Einstein:

Autobiographisches. In: *Albert Einstein, Philosopher-Scientist*, P.A. Schilpp ed., The Library of Living Philosophers, Evanston (1949).

Niels Bohr:

Discussions with Einstein on Epistemological Problems in Atomic Physics. In: *Albert Einstein, Philosopher-Scientist*, P.A. Schilpp ed., The Library of Living Philosophers, Evanston (1949).

John S. Bell:

On the Einstein Podolsky Rosen Paradox. *Physics* (NY) **1**, 195-200 (1964). Abgedruckt in J.S. Bell, *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics* Cambridge University Press, Cambridge (1987).

D.M. Greenberger, M.A. Horne and A. Zeilinger:

Going beyond Bell's Theorem. In: *Bell's Theorem, Quantum Theory and Conceptions of the Universe*, M. Kafatos, Ed., Kluwer, Dordrecht (1989), pp. 73-76.

N.D. Mermin:

Quantum mysteries revisited. *Am. J. Phys.* **58**, 731-734 (1990).

D.M. Greenberger, M.A. Horne, A. Shimony and A. Zeilinger:

Bell's theorem without inequalities. *Am. J. Phys.* **58**, 1131 (1990).

★ ★ ★

Wir danken
dem Bundesministerium für Wissenschaft und Forschung
für die finanzielle Unterstützung
bei der Drucklegung dieses Werkes.

Die deutsche Bibliothek / CIP Einheitsaufnahme

Naturwissenschaft und Weltbild : Mathematik und
Quantenphysik in unserem Denk- und Wertesystem / hrsg. von
Hans-Christian Reichel und Enrique Prat de la Riba. – Wien :
Hölder-Pichler-Tempsky, 1992
ISBN 3-209-01466-3
NE: Reichel, Hans-Christian [Hrsg.]

ISBN 3-209-01466-3

Copyright © 1992 by Verlag Hölder-Pichler-Tempsky, Wien

Alle Rechte vorbehalten.

Jede Art der Wiedergabe – auch auszugsweise – bedarf der
schriftlichen Genehmigung des Verlages.

Gedruckt auf Papier aus chlorfrei gebleichten Rohstoffen.

Satz und Druck: Schloßberg Druck- und Werbezentrums, Graz
Umschlagdruck: Becvar, Wien
Bindung: G.G. Buchbinderei, Hollabrunn

INHALTSVERZEICHNIS

<i>Vorwort</i>	5
Mathematik und Weltbild	
<i>Hans-Christian Reichel</i>	9
Mathematik und Weltbild seit Kurt Gödel	
<i>Gregory J. Chaitin</i>	30
Zahlen und Zufall - Algorithmische Informationstheorie Neueste Resultate über die Grundlagen der Mathematik	
<i>Karl Sigmund</i>	45
Spiel und Biologie: Vom Mitspielen zur Zusammenarbeit	
<i>Leopold Schmetterer</i>	59
Bemerkungen zum Thema Mathematik und Glaube	
Physik und Weltbild	
<i>Wolfgang Kummer</i>	63
Naturwissenschaftliche Interpretation und Weltbild	
<i>Kurt Baumann</i>	80
Die Deutungen der Quantentheorie	
<i>John S. Bell</i>	85
Indeterminismus und Nichtlokalität	
<i>Anton Zeilinger</i>	99
Physik und Wirklichkeit Neuere Entwicklungen zum Einstein-Podolsky-Rosen Paradoxon	
<i>Dieter Flamm</i>	122
Neueres zum Weltbild der Quantenmechanik	



Naturwissenschaft und Weltbild

*Mathematik und Quantenphysik
in unserem Denk- und Wertesystem*

KURT BAUMANN * JOHN S. BELL * GREGORY J. CHAITIN * DIETER
FLAMM * WOLFGANG KUMMER * GÜNTHER PÖLTNER * HANS-
CHRISTIAN REICHEL * LEOPOLD SCHMETTERER * JOSEF SEIFERT *
KARL SIGMUND * ANTOINE SUAREZ * PAUL WEINGARTNER *
ANTON ZEILINGER

*Herausgegeben von
Hans-Christian Reichel & Enrique Prat de la Riba*

Verlag Holder – Pichler – Tempsky