

Aus etwas größerer zeitlicher Distanz zu Bohrs und Heisenbergs obiger Positionen möchte ich Auszüge aus einem Vortrag Paulis aus dem Jahr 1949 über „**Die philosophische Bedeutung der Idee der Komplementarität**“ hinzufügen [61]:

„Alle Physiker, welche die Entwicklung bejahen, die in der systematischen Konstruktion des mathematischen Formalismus der Wellenmechanik im Jahre 1927 einen vorläufigen Abschluss fand, müssen zugeben, daß wir heute zwar Naturwissenschaften, aber kein naturwissenschaftliches Weltbild mehr besitzen. Eben dieser Umstand könnte aber als Korrektur der früheren Einseitigkeit den Keim eines Fortschrittes in Richtung auf ein einheitliches Gesamtweltbild in sich tragen, in welchem die Naturwissenschaften nur ein Teil sind. Hierin möchte ich die allgemeinere Bedeutung der Idee der Komplementarität erblicken, welche dank dem dänischen Physiker Niels Bohr aus dem Boden der Physik gewachsen ist.

...

Im folgenden möchte ich nun an einfachen Beispielen erläutern, wie innerhalb der Physik **die Idee der Komplementarität eine Synthese von entgegengesetzten und einander zunächst widersprechenden Voraussetzungen** ermöglicht hat. Zur Erreichung dieses Ziels waren allerdings weitgehende Verallgemeinerungen des alten Ideals der Kausalität und sogar des Begriffes der physikalischen Realität notwendig. ...

[61] Wolfgang Pauli: „Die philosophische Bedeutung der Idee der Komplementarität“. Vortrag, gehalten in der Philosophischen Gesellschaft Zürich, Februar 1949. Abgedruckt in „Wolfgang Pauli. Physik und Erkenntnistheorie“, Hg. Karl von Meyenn, Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig, 1984, S. 10-17.

...

Die Endlichkeit des Wirkungsquantums, die eine Unterteilung individueller Quantenprozesse ausschließt, stellt also die Physiker vor folgende Situation: Es ist unmöglich, den ganzen Einfluß des Meßapparates auf das gemessene Objekt durch determinierbare Korrekturen in Rechnung zu stellen. Jeder Gewinn an Kenntnis atomarer Objekte durch Beobachtungen muß mit einem unwiderruflichen Verlust anderer Kenntnisse bezahlt werden. Die Naturgesetze verhindern zum Beispiel den Beobachter, eine gleichzeitige Kenntnis sowohl von Energie und Bewegungsgröße als auch von raumzeitlicher Lokalisierung eines Objektes zu erreichen. Welche Kenntnis gewonnen oder welche andere Kenntnis unwiderruflich verloren ist, bleibt der freien Wahl des Experimentators zwischen einander ausschließenden Versuchsanordnungen überlassen.

**Diese Situation wurde von Bohr mit „Komplementarität“ bezeichnet.**

Der Unkontrollierbarkeit des Eingriffes der Beobachtung in das beobachtete System wird dadurch Rechnung getragen, daß die atomaren Objekte nicht in eindeutiger Weise durch die gewöhnlichen physikalischen Eigenschaften beschrieben werden können. Dadurch ist die Voraussetzung einer Beschreibung der Phänomene unabhängig von der Art ihrer Beobachtung nicht mehr erfüllt, und die physikalischen Objekte erhalten einen zwei- oder mehrdeutigen und daher symbolischen Charakter.

Die Beobachter oder Beobachtungsmittel, welche die moderne Mikrophysik in Betracht ziehen muß, unterscheiden sich demnach wesentlich von dem losgelösten Beobachter der klassischen Physik. ...“

## 9.2 Kritik der Kopenhagener Interpretation der Quantentheorie

Niels Bohr, Max Born, Werner Heisenberg, Wolfgang Pauli stehen für die Kopenhagener Interpretation der Quantentheorie. Diese Interpretation geht von einem zufälligen Verhalten eines einzelnen Quantenteilchens aus und gibt dabei die Kausalität auf. Das statistische Ensemble wird im Rahmen der Wahrscheinlichkeitstheorie den quantenmechanischen Gesetzen, beispielsweise der Schrödinger-Gleichung, gerecht.

Albert Einstein, Max Planck, Erwin Schrödinger, Max von Laue lehnten die statistische Interpretation der Quantentheorie ab. In einem Brief an Born schreibt Einstein am 4. Dezember 1926:

„Die Quantenmechanik ist sehr achtung-gebietend. Aber eine innere Stimme sagt mir, daß das doch nicht der wahre Jakob ist. Die Theorie liefert viel, aber dem Geheimnis des Alten bringt sie uns kaum näher. Jedenfalls bin ich überzeugt, daß der nicht würfelt. ...“ [62].

[62] Albert Einstein, Hedwig und Max Born, Briefwechsel 1916-1955. Rowohlt, Reinbek bei Hamburg, 1972.

An dieser Einschätzung hält Einstein fest. am 7. September 1944 schreibt er an Born:

„... Du glaubst an den würfelnden Gott und ich an volle Gesetzlichkeit in einer Welt von etwas objectiv Seiendem, das ich auf wild spekulativem Wege zu erhaschen suche. Ich glaube fest, aber ich hoffe, daß einer einen mehr realistischen Weg, bzw. eine mehr greifbare Unterlage finden wird, als es mir gegeben ist. Der große anfängliche Erfolg der Quantenmechanik kann mich doch nicht zum Glauben an das fundamentale Würfelspiel bringen, wenn ich auch wohl weiß, daß die jüngeren Kollegen dies als Folge der Verkalkung auslegen. Einmal wird's sich ja herausstellen, welche instinktive Haltung die richtige gewesen ist.“ [62]

Planck teilt Einsteins Anliegen. Beispielsweise in einem Brief am 2. Februar 1929 an Arnold Sommerfeld in München schreibt er:

„In dem Kampf zwischen Determinismus und Indeterminismus stehe ich entschieden auf Seite des ersteren, da ich der Meinung bin, daß die aufgetauchten Schwierigkeiten im Grunde nur einer unangemessenen Fragestellung entspringen.“ [63]

[63] Max Planck, rororo Bildmonographie 198, dargestellt von Armin Herman, Reinbek bei Hamburg, 1973, S. 71.

Die Kopenhagener Interpretation der Quantentheorie opfert das klassische Verständnis des Kausalitätbegriffs und ist nicht mit einem „real“ existierenden, separierbaren Einzelobjekt kompatibel. Einstein, Planck, Schrödinger waren nicht bereit, diese Folgerungen für physikalische Theorien zu akzeptieren. Das Festhalten an der Kausalität war für sie unverzichtbar. Kausalität hängt direkt mit der „Ursache-Wirkung-Figur“ und mit dem Unterschied von Vergangenheit und Zukunft zusammen. Auf diese Figur zu verzichten impliziert die Gefahr subjektiver Beliebigkeit. Ein Verzicht auf Kausalität würde das Fundament von Wissenschaft erschüttern. An dieser Stelle sollte die Kantsche Philosophie gültig bleiben. Der Kausalität muss ein höherer Rang als den Begriffen Raum und Zeit vorbehalten bleiben. Auch wenn die moderne Analytische Philosophie bereit ist, von einer „probabilistischen Kausalität“ zu sprechen [64].

Zu dieser prinzipiellen Kritik kommen neue Anforderungen an eine Interpretation der Quantentheorie. Die moderne Experimentalphysik ermöglicht es, einzelne Atome, Elektronen und Photonen zu beobachten und zu manipulieren. Bis in die 1970er Jahre war das noch unvorstellbar. In den ersten 50 Jahren der Quantenmechanik (seit 1925) passte eine statistische Interpretation zur experimentellen Kunst der Atomphysik. Inzwischen gibt es aber nicht wenige Experimente, für die die Kopenhagener Interpretation unbefriedigend ist und ins Leere läuft.

[64] Wolfgang Spohn: „Deterministic Causation“. In „Current Issues in Causation“, Wolfgang Spohn, Marion Ledwig, Michael Elfeld (eds), mentis, Paderborn, 2001, S. 21-46.

### **9.3 Konstruktivistische Interpretation der Quantentheorie**

Die Nichtkommutativität der Observablen in Gestalt der Vertauschungs- und Antivertauschungsrelationen konstituieren Quantenkorrelationen zwischen allen Elementarteilchen wie beispielsweise Photonen, Elektronen, Protonen, Neutronen. Diese Quantenkorrelationen machen das Universum zu einem unteilbaren Ganzen. Die Quantentheorie ist eine holistische Theorie.

Es stellt sich die Frage nach der Möglichkeit von Objekten, im Sinne von Teilobjekten des Universums. A priori gibt es keine Objekte, keine Gegenstände der Beschreibung. Damit gäbe es auch keine Möglichkeit, von Strukturen zu sprechen und sie wahrzunehmen. Es bliebe nur noch diffuses Ahnen, vielleicht Spüren, falls überhaupt noch irgendetwas bleibt. Wenn es keine Strukturen und keine Gegenstände der Beschreibung gäbe, wäre Naturwissenschaft und Wissenschaft überhaupt nicht möglich.

Die Frage nach der Möglichkeit von Objekten hängt eng zusammen mit der Diskussion des Messprozesses im Rahmen der Kopenhagener Interpretation der Quantenmechanik.

### **Beobachtungen zur Vorbereitung einer konstruktivistischen Interpretation**

Ich möchte auf eine grundsätzliche Beobachtung Plancks im Zusammenhang der Diskussion der Thermodynamik der Hohlraumstrahlung zurückgreifen. In „Zur Geschichte der Auffindung des physikalischen Wirkungsquantums“ berichtet er Folgendes ([28], S. 27):

„Zwar war das Wesen der Entropie als ein Maß der Wahrscheinlichkeit im Sinne Boltzmanns auch für die Strahlung endgültig festgestellt. Das zeigte sich besonders deutlich in einem Satz, von dessen Gültigkeit der mir am nächsten stehende Schüler, Max v. Laue, mich in mehrfachen Gesprächen überzeugte, daß die Entropie zweier kohärenter Strahlenbündel kleiner ist als die Summe der Entropien der einzelnen Bündel.“

Eine zweite Beobachtung von grundsätzlicher Bedeutung äußert Einstein in seiner Erwiderung auf die Beiträge im Band zu seinem siebzigsten Geburtstag, den Paul Arthur Schilpp herausgegeben hat [65]. Dabei bezieht sich Einstein auf die Bedeutung der  $\psi$ -Funktion. In der Kopenhagener Interpretation wird die Quantenmechanik als vollständig angesehen. Einstein hält die Quantenmechanik bis dato für unvollständig.

„Was mir an dieser Art des Argumentierens nicht gefällt, ist die nach meiner Überzeugung unhaltbare positivistische Grundeinstellung, die mir mit dem Berkeleyschen Grundsatz „esse est percipi“ [66] zusammenzufallen scheint. Das „Sein“ ist immer etwas von uns gedanklich Konstruiertes, also von uns (im logischen Sinne) frei Gesetztes. Die Berechtigung solcher Setzungen liegt nicht in ihrer Ableitbarkeit aus dem Sinnlich-Gegebenen. Eine derartige Ableitbarkeit (im Sinne einer logischen Deduzierbarkeit) gibt es nie und nirgends, auch nicht in der Domäne des vorwissenschaftlichen Denkens. Die Berechtigung der Setzungen, die für uns das „Reale“ repräsentieren, liegt allein in deren vollkommener oder unvollkommener Eignung, das Sinnlich-Gegebene intelligibel zu machen.“

[65] Albert Einstein: „Bemerkungen zu den in diesem Bande vereinigten Arbeiten“. In Paul Arthur Schilpp (Hrsg.): „Albert Einstein als Philosoph und Naturforscher“, eine Auswahl, Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig, 1983, S. 236.

[66] esse est percipi, Sein ist Wahrgenommensein, ist ein Fazit des irischen Philosophen George Berkeley (1685-1753). Eine Radikalisierung John Lockes (1632-1704) sensualistischen Ansatzes.



### **Konstruktivistische Interpretation der Quantentheorie**

Objekte existieren nicht an sich, sie existieren nicht a priori. **Objekte existieren als Konstrukte. Sie existieren kraft Definition.** Es bedarf eines definierenden Schnitts, um ein Teilsystem des Universums einzugrenzen und als ein Objekt zu konstituieren. Dieser Schnitt zieht die Grenze zwischen „System“ und „Umgebung“ und begründet beide. Er ist nicht notwendig räumlich zu verstehen. Der **Definitionsschnitt** legt fest, welche Quantenkorrelationen außer Betracht gelassen werden und welche weiter Berücksichtigung finden. Er wird beim Aufbau einer experimentellen Anordnung konkret vorgenommen. Die Anordnung präpariert den Gegenstand der Untersuchung. Sie legt fest, was physikalisch eigentlich zu beschreiben ist.

Wir wollen uns einen solchen Definitionsschnitt an einem Beispiel klarmachen.

Denken wir an Elektronen, die an ein elektromagnetisches Feld gekoppelt sind. Die elektromagnetische Wechselwirkung korreliert Elektronen und Photonen zu einem quantenmechanischen Gesamtsystem. Infolge der Kopplung ist es nicht mehr möglich, eine gegenseitige Begrenzung anzugeben. Mit der Kopplung geht der physikalische Begriff des „Elektrons“ wie auch der Begriff „elektromagnetisches Feld“, strenggenommen, verloren. Die beiden Ingredienzien haben im gekoppelten System a priori keine eigene Identität. Um von einem „elektronischen Teilsystem“ sprechen zu können, muß ein „Schnitt“ vorgenommen werden. Ganz unterschiedliche Definitionsschnitte sind denkbar. Entsprechend unterschiedlich ergibt sich dann die „Kopplung“ zwischen dem elektronischen Teilsystem und dem elektromagnetischen Umgebungsfeld. So können wir das elektronische System „stark“ an die Umgebung koppeln, oder wir können es „schwach“ an die Umgebung koppeln. Wir sprechen dann von „stark gekoppelten Elektronen“, oder von „schwach gekoppelten Elektronen“. Ein stark gekoppeltes Elektron und ein schwach gekoppeltes Elektron sind unterschiedliche physikalische Objekte. Schnitte finden in einer mathematischen Idealisierung ihren Niederschlag. Im Falle des schwach gekoppelten Elektrons steht der sogenannte „schwache Kopplungslimes“ für diese Idealisierung [67].

[67] Der aus Malta stammende und am Dublin Institute for Advanced Studies arbeitende Physiker Joe Pulè hat den schwachen Kopplungslimes 1974 mathematisch streng durchgerechnet.  
Joe V. Pulè: „The Bloch Equations“. Communications of Mathematical Physics 38 (1974), S. 241.

Anstelle von Elektronen können wir Kernspins als Teilsystem betrachten. Wir nehmen dieses gekoppelte System Kernspins und Photonen als momentanes "Universe of discourse". In diesem Gesamtsystem ist die Zeitentwicklung reversibel. Wenn wir mit der Idealisierung des schwachen Kopplungslimes auf das Kernspin-Teilsystem fokussieren, erhalten wir als zeitliche Dynamik im Teilsystem die sogenannten „Blochschen Gleichungen“ der Kernspinresonanz. Diese Dynamik ist irreversibel und bildet eine Halbgruppe, im Unterschied zur Gruppe der reversiblen Dynamik im Gesamtsystem.

Dieses für uns paradigmatische Beispiel eines Definitionsschnitts hat zugleich eine sehr wichtige praktische Anwendung: die Kernspin-Tomographie, eine in der Medizin und Biologie schonende Diagnosemethode. Grundlagen zur Nutzung der Kernspinresonanz als bildgebendes Verfahren hat Richard Ernst, ETH-Zürich, gelegt, für die er 1991 den Chemie-Nobelpreis erhielt. Ernst war der erste Doktorand von Hans Primas.

### **Was unterscheidet den Definitionsschnitt der konstruktivistischen Interpretation vom Heisenberg-Schnitt?**

Heisenberg, wie auch Bohr und Pauli setzen den Schnitt zwischen System und Meßapparat. Diesen „Heisenberg-Schnitt“ halte ich für irreführend. Der Meßapparat sollte richtigerweise die Rolle der „Schiere“ spielen, was seine präparative Potenz betrifft. Die Umgebung, mit der das System korreliert ist, kommt beim Heisenberg-Schnitt gar nicht vor. Sollte der Meßapparat allerdings die Rolle der Umgebung spielen, sollte dies auch festgestellt werden. Dann aber ist das Wort „Meßapparat“ eine Fehlspur. Auch die Rede von der Beschreibung des Meßapparats durch klassische Sprache ist eine Fehlspur. Soll der Meßapparat als ein klassisches Objekt aufgefaßt werden? Das wäre inkorrekt, denn strenggenommen gibt es keine klassischen Objekte. Objekte sind notwendig Quantenobjekte. Auch der Meßapparat ist ein Quantenobjekt. Wenn sich „klassisch“ aber nur auf die Beschreibung durch klassische Begriffe bezieht, ist dies kein weiterführendes Argument. Denn durch eine komplementäre Verwendung klassischer Begriffe können wir Quantensituationen perfekt beschreiben.

Die Pulèsche Analyse [67] der schwachen Kopplung von Elektronenfeld (oder Nukleonenfeld) und Photonenfeld zeigt, wie physikalische Systeme präzise konstruiert werden können. Diese mathematisch umsetzbare Idealisierung ist paradigmatisch für eine konstruktivistische Interpretation der Quantentheorie. Die Analyse des schwachen Kopplungslimes, den wir als Definitionsschnitt verstanden wissen wollen, macht darüberhinaus eine Struktureigenschaft von weitreichender Bedeutung deutlich: **das Auftreten der Irreversibilität.**

Das Quantenobjekt, beispielsweise das Elektronenfeld, ist notwendig ein offenes System. Denn es bleibt mit der nach dem Schnitt zurückbleibenden Umgebung gekoppelt, wie immer spezifisch die Kopplung gewählt wird. Diese freie Wahl entscheidet, von welchen Quantenkorrelationen wir abstrahieren.

Jeder Definitionsschnitt wird durch den praktischen Nutzen eines Versuchsaufbaus oder der Präparierung eines gewünschten Quantenobjekts bestimmt. Strenggenommen ist er eine Fiktion. Das offene System ist infolge seiner Irreversibilität einem „Alterungsprozess“ unterworfen.

Wir wissen bereits: Quantenobjekte sind nur näherungsweise räumlich lokalisierbar. Sie sind räumlich unanschaulich. Sie sind ohne Ort, sie sind, im präzisen Sinne des Worts, Utopie. Diese Utopie ist primäre Realität. Ihre raum-zeitliche Verankerung, ihre näherungsweise Lokalisierung ist von nachgeordneter Realität. Dabei liefert die Utopie die Vorlage, die „Blaupause“ für die Konstruktion von raum-zeitlicher Realität.

Das Zufallsverhalten tritt auf, wenn bewegte Quantenobjekte räumlich lokalisiert werden, wenn dabei an einem a priori Raumbegriff festgehalten wird. Auf der „Meta-Ebene“ des Hilbertraums besteht keine Notwendigkeit zur Einführung von Zufall und Wahrscheinlichkeit, auch wenn eine statistische Interpretation mit der Hilbertraum-Ebene verträglich ist.

Die konstruktivistische Interpretation der Quantentheorie hält an der Kausalität fest [68]. Sobald das Quantenobjekt definiert ist, verhält es sich kausal.

[68] Eberhard Müller: „A Constructivistic Interpretation of Quantum Theory preserves Causation“. In “Current Issues in Causation“, Wolfgang Spohn, Marion Ledwig, Michael Elsfeld (eds), mentis, Paderborn, 2001, S. 191-198.

#### 9.4 Der Definitionsschnitt erhöht die Entropie

Der Definitionsschnitt ist das entscheidende Konstruktionsmittel einer konstruktivistischen Interpretation. Eine komplexe Definition mag eine Vielzahl von Schnitten umfassen. Bei jedem Schnitt werden ausgewählte spezifische Quantenkorrelationen vernachlässigt bzw. ausgeblendet. Damit wird die Information, die in den Quantenkorrelationen enthalten ist, „weggeworfen“. Oft wird dies durch ein „Weg-Mitteln“ vorgenommen. Dieses Informationsopfer muss zu einer Erhöhung der Entropie führen. Das bewirkt Irreversibilität.

Dies lässt sich auch mathematisch nachvollziehen.

Sei  $\psi$  der Zustand eines betrachteten gesamten Systems vor einem Schnitt. Wir nehmen im System einen Schnitt vor und erhalten zwei Teile, die durch die Zustände  $\psi_1$  und  $\psi_2$  beschrieben werden. Die beiden Systeme koppeln wir unter Erhaltung ihrer einzelnen Integrität wieder zum gesamten System zusammen. Nach dem Schnitt ist das gesamte System im Zustand  $\psi_1 \otimes \psi_2$ . Dann gilt für den Erwartungswert der Relativ-Entropie (41) nach einer Ungleichung von Oskar Klein (siehe [69]):

$$\langle \psi, R(\psi_1 \otimes \psi_2, \psi) \psi \rangle > 0. \quad (\text{falls } \psi \neq \psi_1 \otimes \psi_2)$$

[69] Res Jost: „Quantenmechanik II“. Verlag der Fachvereine an der ETH-Zürich, 1973; „Der Trennungssatz“, S. 141.

Der Definitionsschnitt unterwirft ein System grundsätzlich der Irreversibilität. Irreversibilität ist Bedingung der Möglichkeit von Konstruktion und Gestaltung. Der Schnitt selbst ist die Ursache der Irreversibilität. **Der Zeitpfeil**, die Asymmetrie zwischen Vergangenheit und Zukunft, **folgt damit aus der Asymmetrie zwischen dem Teil und dem Ganzen**. Diese konstruktivistische Interpretation der Quantentheorie macht die Rede vom Wärmetod des Universums obsolet. Sie liefert die begrifflichen Voraussetzungen für die freie Erzeugung von Objekten.

Die oben zitierte Plancks Bemerkung zielt genau auf einen Schnitt. Die Entropie zweier kohärenter Strahlenbündel ist kleiner als die Summe der Entropien der beiden einzelnen Strahlenbündel.



## 9.5 Anmerkungen zum Konstruktivismus

Der Konstruktivismus hat sich in der Soziologie, in den Sozialwissenschaften, in der Psychologie, in den Geisteswissenschaften entwickelt. In der Physik findet er bisher keine Beachtung. Der „radikale Konstruktivismus“ geht auf Ernst von Glasersfeld zurück [70]. Er geht nicht von einer gegebenen, an sich existierenden Realität aus. Er nimmt Realität als konstruiert an, wobei alle möglichen Einflüsse und Bedingungen berücksichtigt werden müssen.

Wichtige Vertreter des Konstruktivismus sind u. a. der Kommunikationswissenschaftler und Psychotherapeut Paul Watzlawick (1921-2007), der Soziologe Niklas Luhmann (1927-1998) und der Wissenschaftstheoretiker und Philosoph Paul Feyerabend (1924-1994). In der Systemtheorie Luhmanns spielt der Definitionsschnitt eine entscheidende Rolle. Mit dem Schnitt definiert er ein soziales System und zugleich dessen Umwelt.

[70] Ernst von Glasersfeld: „Radikaler Konstruktivismus. Ideen, Ergebnisse, Probleme.“ Suhrkamp Verlag, Frankfurt am Main, 1996.

### **Ein Beispiel aus den Textwissenschaften**

Was ist ein Begriff? Zu einem Begriff gehört ein Wort oder ein Subtext eines Textes. Die „Umgebung“ des Worts oder der Worte, die für einen Begriff stehen, ist der Kontext. Ein Wort allein liefert noch keinen fertigen Begriff. Ohne geschriebenen und ungeschriebenen Kontext bleibt die Bedeutung von Wörtern unklar bzw. uneindeutig. Das Wort „Mutter“ könnte die Mutter eines Kindes, oder die Mutter einer Schraube, oder die Muttergesellschaft eines Industrieunternehmens bedeuten. Mit Ton könnte ein Höreindruck oder der Lehm der Töpferin gemeint sein. ...

Die Art der Korrelation zwischen Wort und Kontext ist für die Bedeutung eines Begriffs entscheidend. Erst die konkrete Anknüpfung an den Kontext führt auf die Definition eines Begriffs. Entsprechend kommt es im Laufe der Zeit mit der Änderung der allgemeinen Lebensumstände zu Verschiebungen von Begriffsbedeutungen: Begriffe „altern“. Wollen wir an ihnen festhalten, müssen wir sie je neu rekonstruieren. Dies zeigt die strukturelle Analogie zur Konstruktion von Systemen und Objekten in einem quantentheoretisch beschriebenen Universum.