

## 9. Zur Interpretation der Quantentheorie

### 9.1 Kopenhagener Interpretation der Quantenmechanik

Die entscheidenden Beiträge zur Interpretation der Quantenmechanik sind die **statistische Interpretation**, die von Max Born stammt (1927) und der Gedanke der **Komplementarität**, der von Niels Bohr entwickelt wurde.

Die Interpretationsfrage entzündet sich am „**Messprozessproblem**“:

Inwiefern beeinflusst der Messakt das Messresultat?

Letzteres wird gelegentlich plakativ an einem provokativen Vorschlag Schrödingers diskutiert, der als „Schrödinger-Katze“ Furore gemacht hat.

Die statistische Interpretation geht von einem Zufallsverhalten eines einzelnen Quantenobjekts aus. In großer Zahl (statistisches Ensemble) ordnen sich Photonen, Elektronen, ... in Interferenzmustern an. Das statistische Ensemble folgt den Gesetzmäßigkeiten der Wellentheorie. Die statistische Interpretation vermittelt zwischen Teilchenbild und Wellenbild.

Für ein einzelnes Teilchen lässt sich nur eine Wahrscheinlichkeitsaussage treffen.

In einem fixierten Raumgebiet haben wir eine gewisse Wahrscheinlichkeit (beispielsweise 40 %), ein Elektron anzutreffen. Wir haben keine Sicherheit, es dort anzutreffen.

Demgegenüber lebt die klassische Mechanik davon, dass wir ein Teilchen präzise lokalisieren und es an diesem Ort mit 100 %iger Sicherheit antreffen können.

**Schattenwurf** mit extrem schwacher Intensität verdeutlicht die Welle-Teilchen-Dualität.

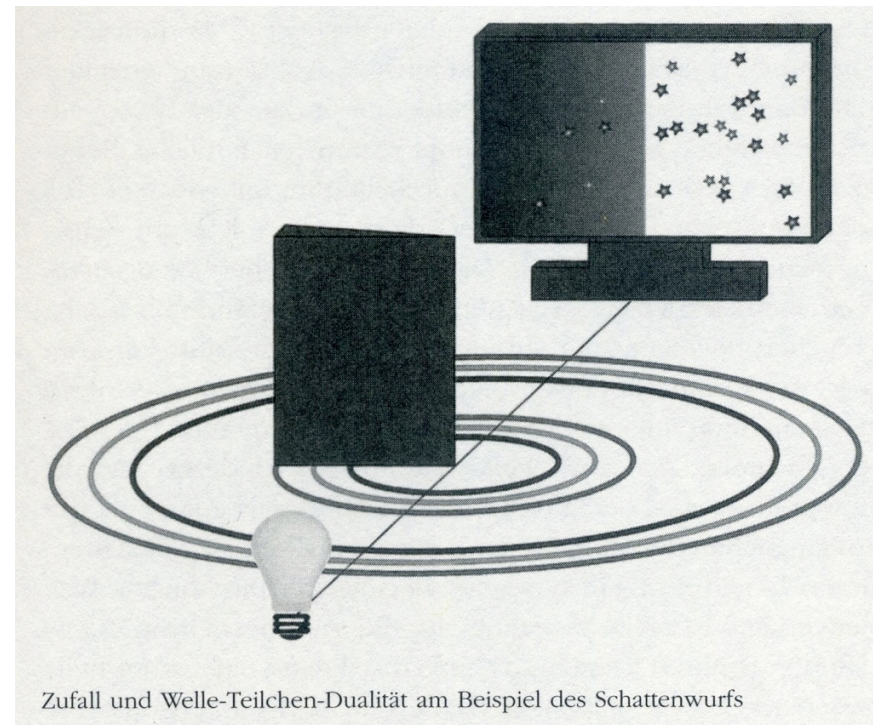
*Schematische Darstellung*

Die Intensität der Lichtquelle wird soweit reduziert, dass einzelne Photonen auf dem Bildschirm auftreffen.

Die Blendenkante ist so scharf, dass der Krümmungsradius wesentlich kleiner ist als die vorkommenden Lichtwellenlängen.

Die Kante wird zum Ausgangspunkt Huygens'scher Elementarwellen, die sich auch in den Schattenbereich hinein ausbreiten. Damit blitzen Photonen auch im Schattenbereich auf.

Die Auftreff-Orte der Photonen sind zufällig. Eine Bahn der Photonen zwischen Lichtquelle und Auftreff-Ort auf dem Bildschirm lässt sich nicht definieren. Bei diesem Experiment werden die Photonen mit dem Auftreffen auf dem Monitor bzw. auf der Photoplatte zur räumlichen Lokalisierung gezwungen.



Mit dem Gedanken der **Komplementarität** hat sich Bohr lange auseinandergesetzt. Im Folgenden ein Auszug aus einem Vortrag von 1936 [66]:

„Eine ... weitergehende Revision des Beobachtungsproblems wurde ... durch die Entdeckung des universellen Wirkungsquantums veranlaßt, die uns darüber belehrt, daß die ganze Beschreibungsart der klassischen Physik mit Einschluß der Relativitätstheorie ihre Zweckmäßigkeit nur solange beibehält, als alle in die Beschreibung eingehenden Wirkungen groß sind im Vergleich zum Planckschen Quantum. Wenn dies nicht der Fall ist, treten, wie in der Atomphysik, **neuartige Gesetzmäßigkeiten auf, die im Rahmen einer Kausalbeschreibung nicht zusammengefaßt werden können.** Dieses zunächst paradox erscheinende Ergebnis findet indessen seine Aufklärung darin, daß auf diesem Gebiete nicht länger scharf unterschieden werden kann zwischen dem selbständigen Verhalten eines physikalischen Objekts und seiner Wechselwirkung mit anderen als Meßinstrumente dienenden Körpern, die mit der Beobachtung unvermeidlich verknüpft ist und deren Berücksichtigung nach dem Wesen des Beobachtungsbegriffs selber ausgeschlossen ist.

[66] Niels Bohr: „Kausalität und Komplementarität“. Vortrag auf dem zweiten Internationalen Kongress für Einheit der Wissenschaft, Kopenhagen 1936. Erkenntnis 6 (1937), S. 293 ff., abgedruckt in Karl v. Meyenn, Klaus Stolzenberg, Roman U. Sexl (Hrsg.): „Niels Bohr“, Vieweg, Braunschweig, 1985; S. 204-205.

Dieser Umstand stellt uns in der Tat vor eine in der Physik ganz neue Situation bezüglich der Analyse und Synthese von Erfahrungen, die uns dazu zwingt, **das Kausalitätsideal durch einen allgemeineren Gesichtspunkt zu ersetzen, den man ‘Komplementarität’ zu nennen pflegt**. Die scheinbar mit einander unverträglichen Auskünfte über das Verhalten des Untersuchungsobjektes, die wir bei Benutzung verschiedener Meßanordnungen bekommen, lassen sich nämlich offenbar nicht in gewöhnlicher Weise miteinander verbinden, sondern dürfen als komplementär zu einander bezeichnet werden. Insbesondere erklärt sich das Scheitern jedes Versuchs, den durch das Wirkungsquantum symbolisierten Zug von ‘Individualität’ der atomaren Einzelprozesse durch eine Unterteilung ihres Verlaufs näher zu analysieren, dadurch, daß jeder durch direkte Beobachtung definierbare Schnitt in diesem Verlauf eine Meßanordnung verlangen würde, die mit dem Zustandekommen der betreffenden Gesetzmäßigkeiten selber unverträglich wäre. ...“

## Heisenberg-Schnitt

Der Eingriff des Beobachters steht im Zentrum der Diskussion, die insbesondere Bohr, Heisenberg und Pauli führen. Heisenberg betrachtet einen Schnitt zwischen Quantenobjekt und Messapparat [67]:

„Es zeigte sich, dass in unserer Erforschung atomarer Vorgänge ein eigentümlicher Zwiespalt unvermeidbar ist: Einerseits sind die experimentellen Fragen, die wir an die Natur richten, stets mit Hilfe der anschaulichen Begriffe der klassischen Physik formuliert und bedienen sich insbesondere der Begriffe von Raum und Zeit der Anschauung; denn wir besitzen ja gar keine andere als diese den Gegenständen unserer alltäglichen Umgebung angepasste Sprache, mit der wir z. B. den Aufbau der Messapparate beschreiben könnten, und wir können Erfahrungen nicht anders als in Raum und Zeit machen. Andererseits sind die mathematischen Gebilde, die sich zur Darstellung der experimentellen Sachverhalte eignen, Wellenfunktionen in mehrdimensionalen Konfigurationsräumen, die keine einfache anschauliche Deutung zulassen.

[67] Werner Heisenberg: „Wandlungen der Grundlagen der exakten Naturwissenschaft in jüngster Zeit“. Vortrag vor der Gesellschaft deutscher Naturforscher und Ärzte, Hannover, 17. September 1934. *Angewandte Chemie* 47 (1934), S. 697-702; Zitat S. 698.

Aus diesem Zwiespalt ergibt sich die Notwendigkeit, bei der Beschreibung atomarer Vorgänge einen **Schnitt** zu ziehen **zwischen den Messapparaten des Beobachters**, die mit den klassischen Begriffen beschrieben werden, **und dem Beobachtungsobjekt**, dessen Verhalten durch eine Wellenfunktion dargestellt wird. Während nun sowohl auf der einen Seite des Schnitts, die zum Beobachter führt, wie auf der anderen, die den Gegenstand der Beobachtung enthält, alle Zusammenhänge scharf determiniert sind - hier durch die Gesetze der klassischen Physik, dort durch die Differentialgleichungen der Quantenmechanik -, äußert sich die Existenz des Schnittes doch im Auftreten statistischer Zusammenhänge. An der Stelle des Schnittes muss nämlich die **Wirkung des Beobachtungsmittels** auf den zu beobachtenden Gegenstand **als eine teilweise unkontrollierbare Störung aufgefasst** werden.“

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 [68]:

„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. ...

[68] 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. ...“ [69].

[69] 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, bezw. 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.“ [69]

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.“ [70]

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

Die Kopenhagener Interpretation der Quantentheorie opfert das klassische Verständnis des Kausalitätsbegriffs 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 [71].

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.

[71] 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 ([31], 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 [72]. 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“ [73] 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.“

[72] 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.

[73] 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 [74].

[74] 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.

## **Elementare Beispiele der Konstitution von Quantenobjekten durch Definitionsschnitte**

### **1. Kernspin-Resonanz-System** (Kernspin-Tomographie)

(NMR: Nuclear magnetic resonance; MRT: magnetische Resonanz-Tomographie.)

Definitionsschnitt durch die mathematische **Idealisierung** des Pulèschen **schwachen Kopplungs-Limes**.  
Siehe oben.

### **2. Ein mit Helium gefüllter Ballon**

Der Atomkern und die beiden ihm zugeordneten Elektronen eines Helium-Atoms müssen, streng genommen, als Quantenobjekte durch Dirac-Quantenfelder beschrieben werden, die Lösungen der Dirac-Gleichung sind. Die beiden Protonen-Felder und die beiden Neutronen-Felder des Kerns sind mit den quantenmechanischen Elektronenfeldern verschränkt. Die Helium-Atome wiederum sind untereinander verschränkt. Damit haben wir im Ballon ein untrennbar verschränktes Gesamtsystem von sich überlagernden Dirac-Feldern, die ein Gesamtfeld bilden. Der Begriff von einzelnen „Helium-Atomen“ und der Begriff eines mit Helium-Atomen gefüllten Ballons sind nicht mehr anwendbar. Begriffe, deren Gültigkeit wir anfangs selbstverständlich unterstellt hatten. Um von „einem mit Helium gefüllten Ballon“ sprechen zu können, müssen wir Definitionsschnitte im quantenmechanischen Gesamtsystem vornehmen.

Zunächst können wir uns zu einer nichtrelativistischen Beschreibung entscheiden. Dazu gehen wir von der relativistischen Dirac-Gleichung zur **nichtrelativistischen** Schrödinger-Gleichung über. Diese Approximation, diese **Idealisierung** ist sinnvoll, wenn die vorkommenden Geschwindigkeiten „klein“ sind gegenüber der Lichtgeschwindigkeit.

Zum Zweiten bedarf es der **Definition des Begriffs des „Atoms“** (im Sinne der Chemie). Dazu betrachten wir den Kern des Helium-Atoms, der sich aus zwei Protonen und zwei Neutronen zusammensetzt. Die Masse des Helium-Kerns ist um den Faktor 7294 größer als die Masse eines Elektrons. Damit ist der Wellencharakter des Kerns viel weniger ausgeprägt als der Wellencharakter eines Elektrons. Deshalb wird die sogenannte **„Born-Oppenheimer-Näherung“** [49] benutzt. In dieser Idealisierung werden die Atomkerne klassisch beschrieben und die Elektronen quantenmechanisch. Eine semi-klassische Beschreibung eines Atoms. – Viele Varianten vergleichbarer semi-klassischer Beschreibungen werden sehr häufig zur Lösung von quanten-physikalischen Aufgabenstellungen herangezogen.

**Durch die Born-Oppenheimer-Näherung wird mit dem Atom-Begriff die Chemie konstituiert.**

Zum Dritten müssen wir **von den Quantenkorrelationen zwischen den Helium-Atomen abstrahieren**. Damit erhalten wir schließlich ein klassisches Gas von Helium-Atomen. Dieses Gas können wir jetzt durch klassische Thermodynamik beschreiben. Aus dem ursprünglichen quantenmechanischen Gesamtsystem (mit Helium gefülltem Ballon) haben wir durch eine Abfolge von frei gewählten Idealisierungen, die durch empirische Plausibilität geleitet sind, ein neues System definiert. Das kommt dem Primas'schen Programm der Theoriereduktion nahe [49].

### 3. Elektromagnetischer Resonator

Wir stellen uns einen elektromagnetischen Resonator mit perfekt reflektierenden Wänden vor, gefüllt mit elektromagnetischer Strahlung. (Eine Kavität mit supraleitenden Wänden kommt diesem Ideal ein Stück weit entgegen.) Die räumliche Begrenzung des Photonengases auf den Innenraum der Kavität (mit einer charakteristischen Kantenlänge  $L$ ) setzt der Ortsunschärfe  $\Delta x$  der Photonen eine Obergrenze:

$$\Delta x < L$$

Aus der Heisenbergschen Unschärfe ergibt sich eine Unschärfe für den Photonen-Impuls:

$$\Delta x \Delta p \geq h/4\pi$$

$$\Delta p \geq h/(4\pi\Delta x)$$

$$\Delta p > h/(4\pi L)$$

Für den Photonenimpuls gilt  $p = h\nu/c$ . Die Impulsunschärfe drückt sich als eine Frequenzunschärfe aus. Dadurch ergeben sich anstelle scharfer Resonanzfrequenzen der Photonen in der Kavität „verschmierte“ Resonanzfunktionen, Gauß-Funktionen mit einer Halbwertsbreite in der Größenordnung der Frequenzunschärfe

$$\Delta\nu > c/(4\pi L)$$

Der Überlappungsbereich der Resonanzfunktionen ergibt die Größe der Wahrscheinlichkeiten von Übergängen von Photonen zwischen den Frequenzen. Das bedeutet:

In einer mit Photonen (und sonst nichts!) gefüllter Kavität mit perfekt reflektierenden Wänden gibt es als Folge der Heisenbergschen Unschärferelation die Möglichkeit von Photonenübergängen zwischen den Resonanzen der Kavität. Dieser Mechanismus erlaubt im Photonengas die Einstellung eines Zustands maximaler Entropie für die vorgegebene Gesamtenergie der Photonen. Dieser Zustand ist der thermische Gleichgewichtszustand. Die ihm zugeordnete Temperatur ist die „spektrale Temperatur“ des Photonengases, die sich aus der Planckschen Strahlungsformel ergibt.

**So lässt sich die Plancksche Vorstellung eines idealisierten schwarzen Kohlestäubchens [75] als eines Agens zur Herstellung einer Gleichgewichtsverteilung durch die Unschärferelation ablösen.** Die „natürliche Linienverbreiterung“ der Resonanzlinien wird in elektromagnetischen Kavitäten durch die viel größere Linienverbreiterung infolge der immer von Null verschiedenen Reflektivität übertroffen. Mit der endlich großen Reflektivität ist der sogenannte „Gütefaktor“ einer elektromagnetischen Kavität (die Zahl der Reflexionen eines Photons, ehe es von den Wänden absorbiert wird) endlich groß. Diesen Befund hatte Planck mit dem gedachten Kohlestäubchen idealisiert [75]. Planck stand damals die Heisenbergsche Unschärferelation nicht zur Verfügung.

[75] Max Planck: „Wärmestrahlung“, vierte Auflage, Johann Ambrosius Barth, Leipzig, 1921, § 52 (S. 48).

Worin findet sich in diesem Beispiel eines elektromagnetischen Resonators ein Definitionsschnitt? - Es ist der schiere Bau der Kavität. Im Gegensatz zum Definitionsschnitt für das Kernspin-System ist hier der Schnitt ein räumlicher. Die Kavität gibt den Photonen einen definierten Raum, was wesentliche, prägende Folgen hat, die Irreversibilität inbegriffen. Mit der Kavität wird das Photonengas konstituiert.

#### **4. Zwei-dimensionales Photonengas**

Für den Quanten-Halleffekt (1980 entdeckt von Klaus von Klitzing) ist ein zweidimensionales Elektronen-System von Bedeutung. Zweidimensionale Systeme spielen in jüngster Zeit auch für Photonensysteme eine wichtige Rolle. Dabei geht es einmal um Photonen, die sich mit Quasiteilchen eines Festkörpers verbinden, beispielsweise mit Exzitonen (Elektron-Loch-Paare). Ein solches Photon-Exzitonen-System heißt Polariton. Zum andern geht es um Photonen in einer Kavitäten-Falle. Dieser Fall soll hier skizziert werden.

In einer Kavität wird eine Vorzugsrichtung vorgegeben, in der sich eine stehende elektromagnetische Welle mit einem stationären Schwingungsknoten ausbildet. Damit liegt in dieser „longitudinalen“ Richtung Wellenverhalten vor und die Photonen haben Masse:

$$E = mc^2 \quad \text{und} \quad E = h\nu \quad \Rightarrow \quad m = h\nu/c^2$$

Die transversale Ebene wird durch die Helizitäts-Freigrade der Photonen aufgespannt. In dieser Ebene bleibt der Quantencharakter der Photonen erhalten und lässt sich als zweidimensionales Quantengas betrachten.

In einer solchen Kavitäten-Falle wird, gewissermaßen, die Quanten-Integrität der Photonen aufgespalten: Bezüglich dem longitudinalen Freiheitsgrad verhalten sie sich wie eine klassische elektromagnetische Welle. Bezüglich der beiden transversalen Freiheitsgrade behalten sie ihren Quantencharakter. In dieser quasi semi-klassischen Näherung erhalten wir **„zwei-dimensionale Photonen“** mit von Null verschiedener Ruhemasse. Ruhemasse insofern, als der Knoten der elektromagnetischen Welle in der longitudinalen Richtung stationär ist. Mit diesem **konstruktiven Definitionsschnitt** erhalten wir mit zweidimensionalen Photonen ein völlig neues Quantenobjekt, welches sich höchst signifikant von freien drei-dimensionalen Photonen unterscheidet, die wir von der irreduziblen Darstellung der Poincaré-Gruppe kennen, der Symmetriegruppe der Einsteinschen speziellen Relativitätstheorie.

Der hier beschriebene Definitionsschnitt wird als **„paraxiales Licht“** bezeichnet („nahe an der Achse“). Dieses Setting benutzen Martin Weitz et al., Universität Bonn, um Bose-Einstein-Kondensation in einer zweidimensionalen Mikrokavität zu erzeugen [76].  
(Siehe unten 10.2. Quantenkorrelationen und ihre zentrale Rolle bei der Bose-Einstein-Kondensation.)

[76] J. Klaers, J. Schmitt, T. Damm, F. Vewinger, M. Weitz: “Bose-Einstein condensation of paraxial light”.  
Appl. Phys. B (2011) 105: 17. <https://doi.org/10.1007/s00340-011-4734-6>. First Online: 15 September 2011.

## 5. Casimir-Effekt

Die Lokalisierung  $\Delta x$  eines Teilchens mit relativistischem Impuls  $mc$  ist, entsprechend der Heisenbergschen Unschärferelation, durch seine halbe Compton-Wellenlänge  $\lambda_C$  begrenzt:

$$\Delta x \geq h / (2\pi mc) ; \quad \lambda_C := h / (2\pi mc)$$

Zum relativistischen Impuls  $mc$  gehört die Energie  $mc^2$ . Wir betrachten den Fall eines Elektrons, mit Ruheenergie  $m$ . Wird bei einer Lokalisierung die doppelte Energie  $2mc^2$  aufgebracht (ihm entspricht dann ein relativistischer Impuls  $2mc$ ), dann kommt es zu einer spontanen Erzeugung eines Elektron-Positron-Paars aus dem Quanten-Vakuum. Dieses Paar wird sofort wieder vernichtet. Man spricht deshalb von „virtuellen“ Teilchen, die im Vakuum ständig erzeugt und vernichtet werden. Das Vakuum fluktuiert.

In einem Versuch werden zwei Metallplatten parallel aufgestellt, auf die keinerlei Kräfte wirken, so dass sie ausschließlich dem Vakuum ausgesetzt sind. Der Zwischenraum dieser Platten ist ein elektromagnetischer Resonator. Dieser Resonator lässt nur einen Teil der Fluktuationen des Vakuums zu. Damit erfahren die Wände des Resonators von außen einen höheren Impuls als von innen. Das führt zu einer messbaren Anziehungskraft zwischen den Platten. Dieser Effekt heißt „Casimir-Effekt“ ([65], S.104). Die beiden Platten stehen für einen elementaren Definitionsschnitt, der erst den Effekt kreiert.



### **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 „Schere“ 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 [74] 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 und 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 [77]. Sobald das Quantenobjekt definiert ist, verhält es sich kausal.

[77] Eberhard Müller: „A Constructivistic Interpretation of Quantum Theory preserves Causation“. In „Current Issues in Causation“, Wolfgang Spohn, Marion Ledwig, Michael Elfeld (eds), mentis, Paderborn, 2001, S. 191-198, wie [71].