

# Ein Streitgespräch im Sommer 1936

Das Gespräch, das Schrödinger und Bohr am  
17. Juli 1936 über die Deutung der Quantenphänomene  
und über die Deutung der Quantentheorie führten

## *Vorbemerkung des Herausgebers*

*Wissenschaftshistoriker haben zuweilen die Ansicht geäußert, die Veröffentlichung des Gesprächs, das Schrödinger und Bohr am 17. Juli 1936 in Oxford führten, sei redundant und überflüssig, da alle Gesichtspunkte und Argumente, die hier zur Sprache kommen, von Bohr und Schrödinger an verschiedenen Stellen schriftlich dargelegt wurden.<sup>1</sup> Darüber hinaus hätten die schriftlichen Arbeiten der Autoren den großen Vorteil der systematisch geordneten Argumentation, während das Gespräch von 1936, da es spontan und ohne Tagesordnung verlief, den Eindruck eines zuweilen chaotischen Verlaufs hinterlasse. Obwohl letzterer Einwand nicht völlig unberechtigt ist, halte ich die Lektüre des Gesprächs für überaus lohnend. Denn tatsächlich ist mir kein anderes Dokument bekannt, in dem Bohr seine Überlegungen zur Deutung der Quantentheorie so einleuchtend und präzise formuliert wie hier. Wer die umständlich geschraubten, oft quälend schwerfälligen und entsprechend schwer verständlichen Satzkonstruktionen von Bohrs schriftlichen Arbeiten kennt, wird seine klare Sprache im direkten Gespräch doppelt zu schätzen wissen. Das ist Schrödinger zu verdanken, der Bohr mit immer neuen Einwänden herausfordert, und hartnäckig auf vollständiger Klarheit in allen Argumenten besteht. Vor allem dadurch wird die Dokumentation dieses Streitgesprächs der beiden Pioniere*

---

<sup>1</sup> Siehe dazu insbesondere die in der Literaturliste am Ende dieser Mitteilung genannten Quellen.

*der Quantentheorie zu einem bedeutenden Beitrag in der Debatte über die Deutung dieser Theorie, die ja bis heute nicht zu einem von allen Physikern akzeptierten Abschluss gelangen konnte.*

*Um das Gespräch einem möglichst breiten Leserkreis zugänglich zu machen, habe ich in zahlreichen Fußnoten Erklärungen physikalischer Fachbegriffe und weitere Hinweise eingefügt, sowie einige Literaturverweise an das Dokument angehängt. Außerdem habe ich versucht, dem Dokument durch einige Zwischen-Überschriften eine gewisse Gliederung zu verleihen.*

*Neunhof, im Januar 2012*

*Gerold Gründler*

Am 15. Juli 1936 hielt Bohr<sup>2</sup> in Burlington-House in London einen Vortrag vor der Royal Society. Er nutzte die Gelegenheit, um im Anschluss nach Oxford zu reisen, wo er Schrödinger<sup>3</sup> treffen und mit ihm über die jüngsten Entwicklungen der Quantentheorie diskutieren wollte.

Schrödinger arbeitete zu dieser Zeit als „Fellow“ am Magdalen College der Universität Oxford. Aus Empörung über das Verhalten der Nazis hatte er im November 1933 seinen Lehrstuhl<sup>4</sup> für Theoretische Physik an der Friedrich-Wilhelms-Universität<sup>4</sup> in Berlin aufgegeben, und war nach Oxford ausgewichen, wo er (unterbrochen durch kurzfristige Gastprofessuren an anderen Universitäten) bis 1936 blieb.

Es ist Freitag der 17. Juli 1936, etwa 9 Uhr vormittags. Nachdem Bohr Schrödingers Büro gefunden hat, und die Physiker sich begrüßt haben, konzentriert sich das Gespräch schnell auf die

---

<sup>2</sup> Niels Bohr (1885 - 1962)

<sup>3</sup> Erwin Schrödinger (1887 - 1961)

<sup>4</sup> 1949 wurde diese Universität in „Humboldt-Universität“ umbenannt.

Interpretation des Zustandsvektors der Quantenmechanik.

## 1. Der Augenöffner

SCHRÖDINGER: Die allgemeine Begriffsverwirrung, die leider für die derzeitige Quantentheorie charakteristisch ist, zeigt sich nirgendwo deutlicher als bei der Zustandsfunktion. Diese Funktion beschreibt einerseits nicht nur den Zustand, in dem sich ein Quantensystem objektiv befindet, andererseits aber auch nicht nur das, was ein Mensch über das Objekt, dessen Zustand er beschreibt, weiß oder in Erfahrung bringen kann. Vielmehr werden objektive Tatbestände und subjektive Kenntnisse von Beobachtern in einer einzigen Zustandsfunktion untrennbar vermischt.

Wäre die Zustandsfunktion eines Quantenteilchens nur ein Katalog der Informationen, die ein Beobachter über das Teilchen gesammelt hat, dann würde man sagen dass dieser Katalog, wenn er einen präzisen Wert des Impulses enthält, einen präzisen Wert des Ortes nur deswegen nicht enthalten kann, weil – wie Heisenbergs Unbestimmtheitsrelationen zeigen – die endliche Größe des Planck'schen Wirkungsquantums die gleichzeitige präzise Messung kanonisch konjugierter Größen verhindert. Dabei bliebe dann aber unklar, ob das Teilchen an sich zwar gleichzeitig einen präzisen Impuls und einen präzisen Ort hat, wir lediglich nicht beide gleichzeitig genau kennen können, oder ob tatsächlich – auch ohne Bezug auf einen Beobachter – zu einer Zeit nur höchstens eine dieser Größen einen präzisen Wert hat.

Die derzeitige Quantentheorie verlangt von uns zu glauben, dass letzteres der Fall ist, dass also objektiv und ganz unabhängig von unseren Messmöglichkeiten und Kenntnissen als menschliche Beobachter niemals zwei kanonisch konjugierte Größen eines Quantenobjekts gleichzeitig einen wohldefinierten Wert haben können.

Das vielleicht einfachste Beispiel, aus dem das hervorgeht, ist ein zweiatomiges vibrierendes Molekül. Ein Vibrationsspektrum, in dem die Spektrallinien so scharf definiert sind wie man es in den Experimenten beobachtet, ergibt sich aus der Berechnung mit der derzeitigen Quantentheorie nur mithilfe einer Zustandsfunktion, in der der Schwerpunkt jedes der beiden Atome über einen Bereich verschmiert ist, der von mindestens gleicher Größenordnung ist wie der durchschnittliche Abstand zwischen beiden Atomen.

BOHR: Es ist nicht so, dass die Quantentheorie von uns verlangt, irgend etwas einfach zu glauben. Sondern es ergibt sich aus der sorgfältigen Analyse, dass die Zustandsfunktion die Menge der Variablen eines Quantensystems, die ein Beobachter kennen kann, vollständig beschreibt, und dass dieser Satz an Variablen identisch ist mit dem Satz der Variablen, die im System einen wohldefinierten Wert haben. Es gibt keine weiteren Variablen, die uns leider unbekannt sind, obwohl sie einen wohldefinierten Wert haben.

Wir müssen uns daran erinnern, wie physikalische Größen definiert werden. Sie werden dadurch definiert, dass wir Verfahren beschreiben, mit denen diese Größen experimentell festgestellt werden können, und zwar mithilfe von Messinstrumenten, die klassisch beschrieben werden. Es gibt in der Physik keine Größe, keine einzige, die auf andere Weise definiert wird als durch die Anwendung klassisch beschriebener Messgeräte.

SCHRÖDINGER: Sie betonen, dass Messgeräte klassisch beschrieben werden müssen. Warum eigentlich? Wir können sie doch auch als – wenn auch außerordentliche komplexe – Riesenmoleküle betrachten, und deshalb auch – zumindest im Prinzip – mit den gleichen quantentheoretischen Methoden beschreiben wie ein einfaches Wasserstoff-Molekül.

BOHR: Das können wir, aber dann können diese Riesenmoleküle nicht ihre Funktion als Messgeräte erfüllen. Ein gutes Beispiel ist

die Höllenmaschine mit der Katze, die Sie vor einigen Monaten beschrieben haben.<sup>5</sup> Der Geigerzähler steht in Wechselwirkung mit

<sup>5</sup> In einem Artikel [1], der ein halbes Jahr vor dem hier berichteten Gespräch veröffentlicht wurde, beschreibt Schrödinger folgende „burleske“ Situation: Eine Katze wird in eine Kiste gesperrt, in der sich außerdem – durch ein Gitter vor dem Zugriff der Katze geschützt – ein Geigerzähler und ein schwach radioaktives Präparat befinden. Der Geigerzähler ist an einen Elektromagneten gekoppelt, an dem ein Hammer hängt. Unter dem Hammer befindet sich eine gläserne Ampulle, die mit konzentrierter Blausäure gefüllt ist. Sobald der Geigerzähler anspricht, wird der Stromkreis des Magneten unterbrochen, der herabfallende Hammer zertrümmert die Ampulle, und die verdampfende Blausäure tötet innerhalb von Sekunden die Katze.

Zur Zeit  $t = 0$  wird die lebende Katze in die Kiste gesetzt und der Deckel geschlossen. Das Quantensystem, das sich in der Kiste befindet, kann durch den Zustandsvektor

$$|\psi(t)\rangle = a_1(t) |\text{Zerfall}_{\text{ja}}, \text{Katze}_{\text{tot}}\rangle + a_2(t) |\text{Zerfall}_{\text{nein}}, \text{Katze}_{\text{lebt}}\rangle \quad (1)$$

beschrieben werden.  $\text{Zerfall}_{\text{ja}}, \text{Katze}_{\text{tot}}$  bedeutet, dass ein Atomkern zerfallen ist, demzufolge der Geigerzähler angesprochen hat, der Hammer die Ampulle zertrümmert hat, und die Katze tot ist.  $\text{Zerfall}_{\text{nein}}, \text{Katze}_{\text{lebt}}$  bedeutet das Gegenteil.

$a_1(t)$  und  $a_2(t)$  sind die Amplituden der beiden Teile der Zustandsfunktion zur Zeit  $t$ . Beide sind gleichzeitig von Null verschieden, da ja beides möglich ist.

Die Wahrscheinlichkeit dafür, die Katze beim Öffnen der Kiste zur Zeit  $t$  lebend oder tot vorzufinden, ergibt sich aus dem Betragsquadrat des Zustandsvektors:

$$\begin{aligned} \langle \psi(t) | \psi(t) \rangle &= \underbrace{a_1^*(t) a_1(t) \langle \text{Zerfall}_{\text{ja}}, \text{Katze}_{\text{tot}} | \text{Zerfall}_{\text{ja}}, \text{Katze}_{\text{tot}} \rangle}_{> 0} + \\ &+ a_1^*(t) a_2(t) \underbrace{\langle \text{Zerfall}_{\text{ja}}, \text{Katze}_{\text{tot}} | \text{Zerfall}_{\text{nein}}, \text{Katze}_{\text{lebt}} \rangle}_{\approx 0} + \\ &+ a_2^*(t) a_1(t) \underbrace{\langle \text{Zerfall}_{\text{nein}}, \text{Katze}_{\text{lebt}} | \text{Zerfall}_{\text{ja}}, \text{Katze}_{\text{tot}} \rangle}_{\approx 0} + \\ &+ \underbrace{a_2^*(t) a_2(t) \langle \text{Zerfall}_{\text{nein}}, \text{Katze}_{\text{lebt}} | \text{Zerfall}_{\text{nein}}, \text{Katze}_{\text{lebt}} \rangle}_{> 0} \end{aligned}$$

dem radioaktiven Präparat, aber er ist kein klassisch beschriebenes Messgerät. Weil Sie den Zähler, und das gesamte nachgeschaltete makroskopische Inventar der Kiste – einschließlich der Katze – nicht klassisch sondern quantentheoretisch beschreiben, gibt es kein Messergebnis. Stattdessen müssen Sie den Zustand des Inventars als Überlagerung zweier Möglichkeiten beschreiben, deren Amplituden beide von Null verschieden sind.

Ein Messergebnis gibt es erst, wenn Sie zur klassischen Beschreibungsweise wechseln, also spätestens wenn Sie den Beobachter ins Spiel bringen.<sup>6</sup> Der Beobachter beobachtet niemals die Mischung unterschiedlicher Messergebnisse, sondern eindeutig genau eines. Welches Ergebnis er beobachtet, das können wir im Allgemeinen nicht im Voraus wissen. Indem wir die Betragsquadrate der Amplituden bilden, können wir lediglich die Wahrscheinlichkeit berechnen, mit der ein bestimmtes Messergebnis beobachtet wird.

---

Während die gemischten Terme durch „Dekohärenz“ (unkontrollierte Verschränkung mit der Umgebung) in unmessbar kurzer Zeit unmessbar klein werden, sind der erste und der vierte Summand sicher größer als Null. Wäre die Zustandsfunktion nur Ausdruck der unvollständigen Kenntnis des Beobachters, dann wären die gleichzeitig von Null verschiedenen Amplituden der Möglichkeiten „Katze lebt“ und „Katze tot“ in der Zustandsfunktion (1) unproblematisch. Schrödinger führte aber in seinem Artikel, genau wie hier im Gespräch mit Bohr, das Vibrationsspektrum zweiatomiger Moleküle als Beispiel dafür an, dass die Zustandsfunktion einen objektiven Tatbestand beschreibt. Die Vorstellung, dass in der objektiven Wirklichkeit der Zustand des Systems eine gleichzeitig lebende und tote Katze enthalten könnte, erschien Schrödinger jedoch vollkommen unsinnig.

<sup>6</sup> Wieso sollte man zur klassischen Beschreibungsweise wechseln, wenn der Beobachter ins Spiel kommt? Der Beobachter ist doch auch aus Molekülen aufgebaut, und sollte als Quantenobjekt beschrieben werden können. Hier übersieht Schrödinger eine offensichtliche Lücke in Bohr's Argumentation, und fragt leider nicht nach. Wir werden aber sehen, dass das Gespräch im weiteren Verlauf zu dieser Frage zurückkehrt, und Bohr ausführlich darlegt und begründet, wann und warum nach seiner Ansicht eine klassische Beschreibung erforderlich ist.

Wenn wir nun beispielsweise den Ort eines Quantenteilchens durch eine präzise Messung feststellen, dann existiert kein Verfahren, mit dem gleichzeitig auch der Impuls des Teilchens festgestellt werden könnte. Wir können also unter dieser Voraussetzung nicht sagen, was der Begriff „Impuls des Teilchens“ überhaupt bedeuten soll. Denn es fehlt die unverzichtbare Voraussetzung der Definition, nämlich ein Messgerät, das den Impuls eines Teilchens messen kann dessen Ort gleichzeitig genau gemessen wird. Weil der Impuls in diesem Fall nicht definiert werden kann, können wir auch nicht sinnvoll vom Impuls des Teilchens sprechen. Es hat schlichtweg keinen Impuls.

Allgemeiner gesagt: Kanonisch konjugierte Größen eines Objekts sind nur in dem Maße gleichzeitig definiert, das in Heisenbergs Unbestimmtheitsrelationen zum Ausdruck kommt. Wenn man vollständige Genauigkeit wünscht, dann muss man sich im Fall zweier kanonisch konjugierter Größen für die eine oder die andere entscheiden. Wenn die Apparatur geeignet gebaut ist, kann man diese Entscheidung übrigens auch noch im Nachhinein treffen, nachdem die Wechselwirkung zwischen dem Teilchen und dem Messgerät bereits stattgefunden hat.<sup>7</sup> Aber auf jeden Fall muss man diese Entscheidung treffen, und verbaut sich damit endgültig und unwiderrufflich die Möglichkeit, die kanonisch konjugierte Größe festzustellen.

Sie haben es eben für möglich gehalten, dass irgendwelche physikalischen Größen „unabhängig von unseren Messmöglichkeiten und Kenntnissen als menschliche Beobachter“ bestimmte Werte haben könnten, die nur leider aufgrund der endlichen Größe des Planckschen Wirkungsquantums nicht messbar seien. Diese Sprechweise führt Sie in die Irre. Die Möglichkeit der Messung ist konstitutiv

---

<sup>7</sup> Was er mit dieser „verzögerten Wahl“ meint, hat Bohr in seinem Artikel [3] von 1935, auf Seite 698 rechte Spalte unten erklärt.

für jede physikalische Größe. Die Vorstellung einer unmessbaren physikalischen Größe ist in sich widersinnig, so wie die Vorstellung eines schwarzen Schimmels.

SCHRÖDINGER: Dieses epistemologische Postulat, das es uns verbietet nach einer physikalischen Größe zu fragen, wenn wir kein praktisch durchführbares Verfahren angeben können mit dem diese Größe tatsächlich gemessen werden kann, war der klassischen Physik ganz fremd. Sie mussten diesen Notnagel einführen, weil sonst innere Widersprüche der Quantentheorie unübersehbar geworden wären.

BOHR: Ich würde nicht von einem Notnagel, sondern von einer Präzisierung sprechen. Die Quantenphänomene haben uns gelehrt, dass der Vorgang der Messung mit größerer Sorgfalt analysiert werden muss, als man in früheren Jahrhunderten meinte. Aber ich vermute dass es eigentlich nicht das Thema der Messung war, das Sie zur Erfindung der Höllenmaschine mit der Katze veranlasst hat.

SCHRÖDINGER: Mit der zugegebenermaßen etwas drastischen Katzensgeschichte wollte ich vor allem auf die höchst befremdlichen Konsequenzen hinweisen, die sich zwangsläufig ergeben wenn man den Zustandsvektor als Beschreibung eines tatsächlichen, realen Sachverhalts interpretiert, und nicht nur als Auflistung unserer unvollständigen Kenntnisse.

BOHR: Sie versuchen ständig, den Sinn und die Bedeutung der Zustandsfunktion in eine der Schubladen „objektive Tatsache“ oder „subjektive Kenntnis von Beobachtern“ zu zwängen. Zwar kann man von beiden Aspekten etwas in der Zustandsfunktion erkennen, vor allem ist die Zustandsfunktion doch aber ein Hilfsmittel zur Berechnung der Wahrscheinlichkeit, mit der eine Messung dieses oder jenes Ergebnis haben wird. Wenn das Betragsquadrat der Komponente „Katze tot“ im Fall ihrer Höllenmaschine 30 % beträgt,

und das Betragsquadrat der Komponente „Katze lebt“ 70 %, dann bedeutet das doch nicht dass sieben Zehntel der Katze leben und drei Zehntel tot sind, sondern das bedeutet, dass wir die Katze mit 70 %iger Wahrscheinlichkeit vollständig lebend vorfinden werden, wenn wir jetzt die Kiste öffnen und hineinschauen.

SCHRÖDINGER: Die Zustandsfunktion ist mehr als nur ein nützliches Hilfsmittel auf dem Papier des Theoretikers. Sie beschreibt auch etwas, das wirklich „da draußen“ vor sich geht. Man kann doch schwerlich daran zweifeln, dass beispielsweise ein unbeobachtetes einzelnes Teilchen, das einen Doppelspalt durchquert, tatsächlich beide Spalte nutzt<sup>8</sup>, denn wie sollte sonst die Interferenz zustande kommen? Ebenso muss man – wie Gamow gezeigt hat<sup>9</sup> – im Formalismus der derzeitigen Quantentheorie auch annehmen, dass der Zustand eines instabilen Atomkerns eine verschwommene Überlagerung des noch nicht zerfallenen und des bereits zerfallenen Kerns ist. Und weil der Zustand des zerfallenden Atomkerns in der Kiste mit dem Zustand der Katze verschränkt ist, muss der Zustand des

---

<sup>8</sup> Die Quantenmechanik sagt voraus, dass ein einzelnes Teilchen, z. B. ein Elektron, wenn es einen makroskopischen Doppelspalt durchquert, so mit sich selbst interferiert als ob es sich gleichzeitig durch beide Spalte bewegen würde. Während diese verblüffende Konsequenz der Quantenmechanik für andere Teilchen als Photonen jahrzehntelang nur als „Gedankenexperiment“ diskutiert wurde, konnten inzwischen Einteilchen-Interferenzen von Photonen, Elektronen, Neutronen, Atomen, und Molekülen im Labor nachgewiesen werden. Die Quantenmechanik sagt außerdem voraus, dass das Teilchen immer nur durch einen der Spalte tritt (und deshalb die Interferenz verschwindet), sobald man die Apparatur so gestaltet dass festgestellt werden kann, welchen Weg durch den Doppelspalt das Teilchen tatsächlich nimmt. Auch das wurde experimentell bestätigt.

<sup>9</sup> George Gamow (1904 – 1968) gelang die quantenmechanische Beschreibung des  $\alpha$ -Zerfalls von Atomkernen 1928 während eines Gastaufenthalts an Max Borns Institut in Göttingen.

G. Gamow: *Zur Quantentheorie des Atomkerns*,  
Zeits. Phys. **51**, 204–212 (1928), <http://dx.doi.org/10.1007/BF01343196>

Gesamtsystems konsequenterweise die tote und die lebende Katze gleichzeitig enthalten. Wenn wir die derzeitige Quantentheorie ernst nehmen wollen, dann müssen wir dem lebendigen und dem toten Anteil der Katze das gleiche Maß an Realität zugestehen, wie den beiden Teilen eines einzelnen Elektrons, die sich durch die rechte und die linke Öffnung eines Doppelspalts bewegen.

Aber: Wenn die Katze in dem Moment, wo der Deckel der Kiste geöffnet wird, eindeutig tot oder eindeutig lebendig ist, und nicht in einem verschwommenen, nur unscharf definierten Zustand, der Anteile einer toten und einer lebendigen Katze enthält, dann dürfen wir doch wohl annehmen dass sie auch Bruchteile von Sekunden vorher in diesem eindeutigen Zustand war. Denn sie wird doch nicht dadurch getötet, dass man den Deckel hebt, sondern das geschieht – wenn es denn geschieht – durch die Blausäure, die wiederum als indirekte Folge des Kernzerfalls freigesetzt wird. Also dürfen wir doch mit Sicherheit annehmen, dass die Katze vor dem Öffnen der Kiste, obwohl man noch nicht nachgeschaut hat und deswegen auch nicht wissen kann was denn nun der Fall ist, entweder wirklich und tatsächlich lebt, oder wirklich und tatsächlich tot ist. Woraus wiederum bei konsequenter Anwendung der derzeitigen Quantentheorie folgt – wenn denn die Zustandsfunktion einen realen Sachverhalt und nicht nur unsere unvollständige Kenntnis des Sachverhalts beschreiben soll – , dass auch schon vor dem Öffnen der Kiste entweder der Atomkern eindeutig bereits zerfallen oder eindeutig noch nicht zerfallen sein muss, aber keinesfalls in einer Mischung von „Zerfall ja“ und „Zerfall nein“ existieren kann.

BOHR: Aber Sie haben doch gerade selbst das Beispiel der Einteilchen-Interferenz erwähnt. Dies Phänomen zeigt doch völlig klar, dass in der Zustandsfunktion die Amplituden der einander ausschließenden Möglichkeiten „rechter Spalt“ und „linker Spalt“ beide von Null verschieden sein müssen. Sie haben zu Recht als weiteres

Beispiel auch die vibrierenden zweiatomigen Moleküle als Beweis dafür angeführt, dass der Ort der Atome, beziehungsweise ihrer Schwerpunkte, nicht nur uns unbekannt ist, sondern objektiv nicht scharf definiert ist. Für andere Quantensysteme gilt das Gleiche. Also müssen wir auch dem instabilen Atomkern in Ihrer Höllenmaschine einen Zustand zuordnen, der aus „Zerfall ja“ und „Zerfall nein“ gemischt ist, solange noch niemand in die Kiste geschaut und den tatsächlichen Zustand festgestellt hat.

SCHRÖDINGER: Darin liegt der Sinn dieses Katzenexperiments. Einen radioaktiven Atomkern müssen wir gemäß der derzeit geltenden quantentheoretischen Lehrmeinung durch einen Zustandsvektor beschreiben, der die unscharf definierte Überlagerung eines zerfallenen und eines noch nicht zerfallenen Kerns ist. Und zwar, ich betone es noch einmal, die unscharf definierte Überlagerung soll eine objektive Tatsache repräsentieren, nicht nur unsere unvollständige Kenntnis. Dass ein instabiler Atomkern sich in einem derartigen Zwischenzustand befinden könnte, erscheint uns einfach deshalb nicht übermäßig seltsam, weil ein Atomkern unvorstellbar winzig klein ist im Vergleich zu allen Objekten unserer gewohnten Anschauung. Aber nun ist dieser Zustand des Atomkerns verschränkt mit dem Zustand der Katze. Und die Vorstellung eines Zustands mit verschwommen überlagerten Anteilen einer lebendigen und toten Katze ist schlichtweg lächerlich. Die Verschränkung der Zustände, die das atomare Phänomen bis auf Katzenniveau verstärkt, macht die Absurdität der derzeitigen quantentheoretischen Methode unübersehbar.<sup>10</sup>

---

<sup>10</sup> Das Gespräch dreht sich im Kreis, weil 1936 weder Schrödinger noch Bohr die große Bedeutung der Dekohärenz (= unkontrollierte Verschränkung mit der Umgebung) von Quantensystemen bekannt war. Es ist zumindest zweifelhaft, ob man eine Katze jemals in einem kohärenten Quantenzustand wird präparieren können ohne sie dabei zu töten. Deshalb war es aus heutiger Sicht unglücklich, dass Schrödinger in sein Gedankenexperiment ein

BOHR: Selbst wenn es Ihnen absurd erscheint, bleibt uns keine andere Wahl. Die Analyse von Quantenphänomenen hat uns gelehrt, dass wir tatsächlich beiden Amplituden von Null verschiedene Werte zuordnen müssen, solange nicht durch eine Beobachtung festgestellt wird, welche der beiden Möglichkeiten tatsächlich realisiert ist. Wieder ist die Ein-Teilchen-Interferenz das deutlichste Beispiel. Wenn wir das Experiment so aufbauen, dass der genaue Weg des Teilchens durch den Doppelspalt festgestellt werden kann, dann können wir uns so oft wir wollen davon überzeugen, dass jedes Teilchen immer nur einen Spalt benutzt, kein Teilchen geht jemals durch beide. Aber sobald wir den Versuchsaufbau in der Weise abändern, dass wir keine Information mehr darüber erhalten, auf welchem Weg das Teilchen den Doppelspalt durchquert hat,<sup>11</sup> so treten Interferenzen auf, die seit Youngs historischen Untersu-

---

Lebewesen eingebaut hat. Sein Ziel, die Merkwürdigkeit quantenmechanischer Superpositions-Zustände durch Verschränkung mit makroskopischen Objekten zu demonstrieren, hätte er genau so gut erreicht, wenn er es bei der Überlagerung des gefallenen und noch nicht gefallenen Hammers belassen und auf Giftampulle und Katze verzichtet hätte. Dann würde man aus heutiger Sicht sagen, dass es nur eine Frage der Kunstfertigkeit der Experimentatoren ist, den Inhalt der Kiste so zu präparieren, dass ihre Zustandsfunktion gleichzeitig einen gefallenen und einen noch nicht gefallenen Hammer enthält. Zwar kann auch heute noch niemand einen makroskopischen Hammer in einem kohärenten Quantenzustand präparieren, mit großen, aus mehreren Dutzend Atomen bestehenden Molekülen ist das aber inzwischen gelungen. So konnte z. B. die Ein-Teilchen-Interferenz von  $C_{70}$  Molekülen nachgewiesen werden, und dabei konnte auch die zunehmende Dekohärenz (Verlust der Interferenzfähigkeit) durch zunehmende unkontrollierte Verschränkung mit der Umgebung demonstriert werden:

L. Hacker Müller, K. Hornberger, B. Brezger, A. Zeilinger, M. Arndt: *Decoherence of matter waves by thermal emission of radiation*, Nature **427**, 711–714 (2004), <http://dx.doi.org/10.1038/nature02276> oder <https://arxiv.org/abs/quant-ph/0402146>

<sup>11</sup> Bohr hat in [4] die beiden möglichen Realisierungen des Doppelspalt-Experiments ausführlich und gut lesbar diskutiert.

chungen<sup>12</sup> als Beweis dafür gedeutet werden, dass beide Spalte genutzt wurden. Einem Widerspruch können wir nur dadurch entgehen, dass wir das Quantenphänomen als ein unteilbares Ganzes betrachten. Das heißt: Wir müssen die gesamte Anordnung von Spalten und Detektoren, und das Teilchen welches sich in dieser Anordnung bewegt, als einen gesamthaften Vorgang begreifen, den wir nicht einmal in Gedanken in Einzelteile zerlegen dürfen. Die eine Anordnung, die die Teilcheneigenschaft hervorbringt, schließt die andere Anordnung aus, in der Interferenzen auftreten, und umgekehrt. Deshalb tritt kein Widerspruch auf, solange wir wirklich immer die gesamte Anordnung im Auge behalten.

Es wäre ein Fehler zu sagen „nun ja, wir haben uns doch durch unzählige Messungen davon überzeugt, dass jedes Teilchen immer nur einen Spalt durchquert, also dürfen wir doch wohl mit vernünftiger Sicherheit annehmen dass nichts anderes geschieht, wenn wir auf diesen Teil der Beobachtung verzichten“. Denn tatsächlich ist der Verzicht auf die Beobachtung des Weges, den das Teilchen durch die Apparatur nimmt, kein belangloser Nebenaspekt, sondern eine entscheidende, grundlegender Änderung des experimentellen Rahmens. Nur bei diesem grundlegend anderen Aufbau kann die Interferenz erscheinen.

Bei Ihrem Beispiel mit der Katze in der Höllenmaschine ist auch der klassisch beschriebene menschliche Beobachter, der den Deckel der Kiste anhebt und eine eindeutig lebende oder eine eindeutig tote Katze sieht, ein wesentlicher Bestandteil des unteilbaren Quantenphänomens. Weil Sie in Gedanken fehlerhafterweise das klassische Messgerät, nämlich die Augen des Beobachters, vom Quantenphänomen abtrennen, muss Ihnen der – nur phantasiierte, aber nicht beobachtete – unvollständige Rest des Phänomens

---

<sup>12</sup> Thomas Young: *Experiments and Calculations Relative to Physical Optics*, Phil. Trans. Roy. Soc. (London) **94**, 1–16 (1804), <http://dx.doi.org/10.1098/rstl.1804.0001>

natürlich grotesk erscheinen.

SCHRÖDINGER: Sie sprechen von „gesamthaften Vorgängen“ und „unteilbaren Phänomenen“, die wir „nicht einmal in Gedanken in Einzelteile zerlegen dürfen“. Offenbar wollen Sie mir verbieten, solche Details physikalischer Systeme zu untersuchen und zu beschreiben, die nicht unmittelbar beobachtet werden.

Aber immerhin haben wir doch beispielsweise bei der Katze und der Höllenmaschine in der Kiste die Zustandsfunktion<sup>13</sup> dieses Systems, und ihre Entwicklung im Lauf der Zeit. Die Komponente mit toter Katze wächst kontinuierlich an, während die Komponente mit lebender Katze kontinuierlich kleiner wird. Insbesondere sind beide Komponenten von Null verschieden. Das wäre unproblematisch, wenn die Zustandsfunktion nichts weiter als ein abstraktes Hilfsmittel zur Berechnung von Wahrscheinlichkeiten wäre. Wir haben aber jetzt schon mehrfach Beispiele genannt, in denen die Zustandsfunktion offensichtlich doch etwas reales beschreibt. Folglich sollten in einer vernünftigen Quantentheorie keine Zustandsfunktionen auftauchen, die Anteile einer zur gleichen Zeit lebenden und toten Katze und ähnlichen Unfug enthalten.

BOHR: Wie wollen Sie denn die experimentellen Tatsachen beim Doppelspalt oder beim radioaktiven Zerfall erklären, wenn Sie keinen Quantenzustand zulassen in dem einander ausschließende Möglichkeiten gemischt auftreten, wie beispielsweise „rechter Spalt“ und „linker Spalt“, oder „Zerfall ja, Katze tot“ und „Zerfall nein, Katze lebt“?

SCHRÖDINGER: Aus der Albernheit tot-lebendiger Katzen und dergleichen ziehe ich den Schluss, dass eine vernünftige Quantentheorie von Grund auf anders konstruiert werden muss als die gegenwärtig existierende Theorie. Die Interferenzexperimente beweisen nicht

---

<sup>13</sup> Schrödinger spricht offenbar von der Zustandsfunktion (1), die in Fußnote 5 auf Seite 5 angegeben wurde.

mehr und nicht weniger, als dass Photonen und Elektronen wirklich zur Interferenz mit sich selbst fähig sind. Als naheliegendste und plausibelste Begründung dafür erscheint mir, dass nicht Teilchen im herkömmlichen Sinne, sondern Wellenfelder angemessene Modelle für Photonen und Elektronen sind. Dass es bisher nicht gelungen ist, Phänomene wie den Compton-Effekt oder den lichtelektrischen Effekt im Wellenbild vollkommen zufriedenstellend zu beschreiben, ist mir bekannt. Aber man darf feststellen dass ein Ei faul ist, auch wenn man selber kein besseres legen kann. Und deshalb erlaube ich mir auch festzustellen, dass die Quantentheorie uns mit der Überlagerung toter und lebender Katzen einen Schmarrn zumutet, auch wenn ich selbst derzeit keine bessere Quantentheorie aus dem Hut zaubern kann.

Ich habe mir dieses bis auf Katzenniveau verstärkte Quantenphänomen ausgedacht, weil es doch eigentlich jedem klarmachen muss wie absurd die Annahmen sind, auf denen die heute existierende Quantentheorie beruht. Denn so eigenartigen Objekten wie Photonen und Elektronen könnten wir allenfalls noch leichten Herzens zugestehen, dass sie irgendwie da und dort und zugleich nicht da und dort sein können, und einen wohldefinierten Ort erst dadurch bekommen, dass wir diesen Ort durch eine Messung festlegen. Aber kaum jemand wird im Ernst glauben wollen, dass eine Katze gleichzeitig irgendwie tot und irgendwie lebendig sein kann, oder vielleicht auch weder das eine noch das andere, und dass sie den einen oder den anderen wohldefinierten Zustand erst dann und dadurch erhält, dass wir diesen Zustand durch eine Messung festlegen. Dieses Katzen-Quantenphänomen kann ein Augenöffner für viele sein, die sich bisher mit den Prämissen der Quantentheorie nur deshalb abfinden, weil ihnen die Tragweite und Konsequenzen dieser absurden Annahmen noch nicht wirklich klar geworden sind.

BOHR: So gesehen gefällt mir Ihr Augenöffner geradezu. Denn

es irritiert mich selbst nicht wenig, wie leichthin viele Leute die Quantentheorie akzeptieren. Wer angesichts der weitreichenden Konsequenzen, die die Quantentheorie für unser Verständnis der Welt und der menschlichen Erkenntnisfähigkeit bedeutet, nicht tief erschrocken ist, der hat sie doch wohl noch nicht richtig verstanden. Aber das Erschrecken darf uns nicht hindern, die experimentellen Fakten zu akzeptieren, auch wenn unsere lieb gewordenen Vorurteile sich dagegen sträuben. Denn obwohl die Quantentheorie ja wirklich eine schwerwiegende Zumutung gegen unsere überkommenen Denkgewohnheiten darstellt, deckt sie sich doch mit allen Experimenten. Dagegen wird – wie Sie gerade selbst gesagt haben – zum Beispiel die Annahme, dass die beiden Atome zweiatomiger Moleküle jederzeit einen wohldefinierten, uns nur nicht bekannten Ort hätten, durch die Vibrationsspektren klar widerlegt. Wollen Sie angesichts dieser Beweislage nicht doch lieber Ihre Vorurteile über Bord werfen?

SCHRÖDINGER: Sie stellen mich vor eine falsche Alternative. Natürlich werden die klassische Physik, und viele der ihr zugrunde liegenden Annahmen, durch die Quantenphänomene zweifelsfrei widerlegt. Aber daraus folgt noch lange nicht, dass die heutige Quantentheorie richtig sein muss. Ich persönlich vermute, dass die richtige Lösung in einer nichtlinearen Theorie zu suchen ist. Nichtlineare Theorien sind zwar formal-mathematisch außerordentlich schwierig, aber Einstein hat uns ja mit der Allgemeinen Relativitätstheorie gezeigt, dass sich diese Schwierigkeiten bewältigen lassen. Ich arbeite bereits seit einiger Zeit an nichtlinearen Konzepten, konnte aber leider bisher keine greifbaren Erfolge erzielen.

BOHR: Schrödinger, ich halte Sie für einen der fähigsten Mathematischen Physiker unserer Zeit. Ich sage das nicht um Ihnen zu schmeicheln, sondern weil es einfach so ist. Aber mit diesem Vorhaben werden Sie scheitern. Nicht wegen mathematischer Schwierig-

keiten, sondern wegen physikalischer Schwierigkeiten. Denn gerade die lineare Struktur der Quantentheorie ermöglicht die eigenartige Kopplung der Zustandsvektoren, die Sie selbst so zutreffend als Verschränkung bezeichnet haben. Es vergeht ja kaum ein Tag, ohne dass unsere experimentell arbeitenden Kollegen neue Ergebnisse melden, die alle darauf hindeuten dass die Verschränkung der Zustände einem grundlegenden Zug der Natur entspricht. Deshalb müssen wir die Linearität der Theorie als unverzichtbar betrachten, als eine tragende Säule, die man nicht beseitigen darf wenn man nicht das ganze Haus zum Einsturz bringen will.<sup>14</sup>

---

<sup>14</sup> Vielleicht hätte Bohr sich vorsichtiger ausgedrückt, wenn 1936 schon diese Theorie bekannt gewesen wäre, die tatsächlich aber erst ein halbes Jahrhundert später veröffentlicht wurde:

G. C. Ghirardi, A. Rimini, T. Weber: *Unified dynamics for microscopic and macroscopic systems*, Phys. Rev. **D34**, 470–491 (1986),

<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.34.470> oder

<http://www.psiquadrat.de/downloads/grw86.pdf>

Es handelt sich um eine modifizierte Quantentheorie, die zwar linear ist, zusätzlich aber nichtlineare Faktoren enthält die nur stochastisch wirksam werden, und zwar um so häufiger, je schwerer und größer das beschriebene System ist. Die stochastische Nichtlinearität bewirkt, dass bei mikroskopischen Systemen wie z. B. Atomen weiterhin Verschränkung auftritt, makroskopische Objekte – z. B. Messgeräte – aber in unmessbar kurzer Zeit auf den eindeutigen beobachteten Messwert „kollabieren“. Für hinreichend große und schwere mesoskopische Objekte macht die Theorie von Ghirardi, Rimini und Weber andere Vorhersagen als die übliche Quantentheorie. Also kann mindestens eine der beiden Theorien experimentell widerlegt werden. Bisher ist das nicht gelungen, weil es außerordentlich schwierig ist ausreichend schwere Systeme hinreichend gut gegen unkontrollierte Wechselwirkung mit der Umgebung abzuschirmen.

## 2. Ein infinites Regress

Schrödinger erlaubt Bohr, zu rauchen. Bald steigen aus Bohrs Pfeife dicke Rauchwolken auf.

SCHRÖDINGER: Sie haben nachdrücklich bestätigt, dass wir korrekterweise den verschränkten quantenmechanischen Zustand von radioaktiven Präparaten und Katzen als Überlagerung gegensätzlicher, einander ausschließender Möglichkeiten formulieren müssen. Seltsamerweise gilt dies aber nur so lange, bis endlich der Beobachter die Szene betritt. In dem Moment, wo er sein Auge auf die infernalische Überlagerung toter und lebender Katzen wirft, verschwindet der Spuk schlagartig wie durch Zauberhand bewirkt, und alle Messgeräte und Katzen nehmen einen vernünftigen, eindeutigen Zustand an. Das wird als Reduktion des Zustandsvektors bezeichnet, und spielt in der Anwendung der derzeitigen Quantentheorie eine zentrale Rolle. Aber niemand kann plausible Kriterien dafür angeben, warum die Wechselwirkung zwischen einem Quantenobjekt und einem makroskopischen Gegenstand manchmal eine Zustandsreduktion des Quantenobjekts bewirkt, manchmal aber nicht. Können Sie eine Theorie wirklich ernst nehmen, die sich an zentraler Stelle, nämlich bei der Messung, derartig haarsträubende Inkonsistenzen erlaubt?

BOHR: Wir müssen stets streng unterscheiden zwischen den Quantenobjekten die wir untersuchen wollen, und den Messgeräten, die wir für diese Untersuchung verwenden. In der Regel sind die Quantenobjekte mikroskopisch – oder besser gesagt submikroskopisch – klein, die Messgeräte dagegen makroskopisch groß. Die Größe ist aber nicht das entscheidende Kriterium. Es ist durchaus zulässig, dass Sie das Inventar Ihrer Höllenmaschine als makroskopisches Quantensystem beschrieben haben. Der radioaktive Zerfall ist unzweifelhaft ein Quantenvorgang, nicht weniger als das Doppelspalt-

experiment mit einem Teilchen. Die hintereinander geschalteten Detektoren vom Geigerzähler bis hin zur Katze verstärken diesen Quantenvorgang auf ein Niveau, wo wir normalerweise ausschließlich eine klassische Beschreibung verwenden. Aber ich kenne kein Kriterium, und glaube auch nicht dass eines gefunden werden könnte, das uns zwingt die Grenze zwischen quantenphysikalischer Beschreibung und klassischer Beschreibung an irgendeiner ganz bestimmten Stelle der Kette vom radioaktiven Zerfall über die Katze bis zu uns als Beobachtern zu ziehen. Sicher ist nur: Der radioaktive Zerfall muss ganz gewiss mithilfe der Quantentheorie beschrieben werden, für ihn gibt es keine klassische Beschreibung. Und uns beide, sowie die Messgeräte mit denen wir den Vorgang beobachten – in diesem Beispiel also unsere Augen – müssen wir zwingend mit der Sprache und den Begriffen der klassischen Physik beschreiben. Aber an welche Stelle zwischen diesen Extrempunkten Sie den Übergang von der einen zur anderen Art der Beschreibung legen, das bleibt letztlich Ihrem Geschmack überlassen.

SCHRÖDINGER: Halt! Wie kommen Sie dazu, Messgeräte und Physiker klassisch zu beschreiben? Schließlich sind beide doch aus Atomen zusammengesetzt, und sollten deshalb ebenfalls durch die Quantentheorie korrekt beschrieben werden. Allerdings gelangt man, wie von Neumann klar gezeigt hat, bei konsequenter Anwendung der derzeitigen Quantentheorie nicht zum tatsächlich beobachteten eindeutigen Messergebnis, sondern läuft in einen infiniten Regress.<sup>15</sup>

---

<sup>15</sup> John v. Neumann (1903-1957) veröffentlichte 1932 die erste mathematisch ausgearbeitete Darstellung der jungen Quantenmechanik: *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik* (Springer, Berlin, 1932) <http://gdz.sub.uni-goettingen.de/dms/load/toc/?PID=PPN379400774>. Weil auch makroskopische Messinstrumente und auch Menschen aus Atomen aufgebaut sind, müssen nach von Neumanns Ansicht *sämtliche* Objekte im Universum mit dem Formalismus der Quantenmechanik beschrieben werden. Das führt dazu,

BOHR: Ihr Stichwort „infiniter Regress“ erinnert mich an einen anderen, seit Jahrtausenden bekannten infiniten Regress und seine seit Jahrtausenden bekannte Lösung, aus der wir hinsichtlich der Interpretation der Quantentheorie einiges lernen können. Ich meine Zeno's<sup>16</sup> bekanntes Paradox vom Wettlauf zwischen Achill und der Schildkröte<sup>17</sup>, und seine Lösung durch Aristoteles.

dass Messgeräte, und letztlich auch die Menschen, die das Messergebnis von den Geräten ablesen, mit den gemessenen Quantenobjekten in einem Überlagerungszustand sämtlicher möglicher Ergebnisse verschränkt werden. Das meint Schrödinger mit dem „infiniten Regress“. Da Menschen aber niemals die Überlagerung verschiedener Messergebnisse beobachten, sondern stets ein einziges, eindeutiges Ergebnis wahrnehmen, postulierte von Neumann, dass die Anzeige von Messergeräten nicht in einer objektiven äußeren Realität, sondern nur im Bewusstsein der Menschen auf einen eindeutigen Wert kollabiert.

Dagegen muss nach der 1926/27 von Heisenberg und Bohr ausgearbeiteten „Kopenhagener Deutung der Quantentheorie“<sup>[6]</sup> ein großer Teil der Welt von Anfang an (und nicht erst nach einem Kollaps) zwingend mit den Methoden der klassischen Physik beschrieben werden. Zum klassischen Teil der Welt gehören insbesondere sämtliche Messinstrumente, sowie die Physiker, die diese Messinstrumente in ihren Experimenten einsetzen und die Messergebnisse diskutieren.

<sup>16</sup> Zeno von Elea (etwa 490 bis etwa 430 BCE), Philosoph aus der griechischen Kolonie Elea in Süditalien. Bekannt sind die Paradoxa, mit denen er beweisen wollte dass Bewegung unmöglich ist. So bewies er zum Beispiel dass ein abgeschossener Pfeil nicht von der Stelle kommt, sondern in der Luft stehen bleibt.

<sup>17</sup> Zeno beschrieb folgende Situation: Achill (ein Griechischer Halbgott und schneller Läufer) trat gegen eine Griechische Landschildkröte (die bekanntlich kaum schneller als eine Schnecke kriechen kann) zu einem Wettlauf an. Großmütigerweise gab Achill der Schildkröte zehn Schritte Vorsprung. Zum Zeitpunkt  $t_0$  wurde das Rennen gestartet, und Achill und die Schildkröte rannten beide los so schnell sie jeweils konnten. Den Startpunkt  $S_0$  der Schildkröte erreichte Achill zum Zeitpunkt  $t_1$ . Aber natürlich war die Schildkröte währenddessen auch ein kleines Stückchen vorangekommen, nämlich bis zum Punkt  $S_1$ . Diesen Punkt  $S_1$  erreichte Achill zur Zeit  $t_2$ , aber die Schildkröte war zu dieser Zeit bereits bis zu  $S_2$  gekrochen. Und als Achill  $S_2$  erreichte,

SCHRÖDINGER: Zenos Problem bestand darin, dass er nicht mit konvergierenden Reihen umgehen konnte. Er konnte sich nicht vorstellen, dass eine Summe endlich sein kann, auch wenn sie aus unendlich vielen Summanden besteht, deren jeder einzelne größer als Null ist.

BOHR: Wirklich anschaulich vorstellen können wir uns das doch auch nicht. Sondern die neuzeitliche Mathematik hat Methoden entwickelt, mit denen sich verlässlich feststellen lässt, ob eine unendliche Reihe konvergiert oder nicht. Und wenn sie konvergiert, so wie beispielsweise die Reihe der Zeitintervalle, die Achill benötigt um den jeweils letzten Wegpunkt der Schildkröte zu erreichen, dann können wir auch mathematisch beweisen dass Achill die Schildkröte in endlicher Zeit einholen wird, und wir können berechnen zu welcher Zeit ihm das gelingt. Das Altertum hat diese Art von Mathematik nicht gekannt. Und genau deswegen ist es so interessant, dass Aristoteles das Paradox dennoch lösen konnte.

SCHRÖDINGER: Wie hat er das gemacht?

BOHR: Er hat eine andere Art der Beschreibung gewählt. Eine Art der Beschreibung, die dem Problem angemessen war. Er erkannte Zenos logischen Fehler in der inkonsistenten Verwendung von Vorstellungen des Unendlichen. Zeno stellte sich vor, dass es unendlich viele Zeiträume gäbe, die Achill brauchte um den jeweils

---

da war die Schildkröte bereits bei  $S_3$ . Und so geht es weiter. Mit jedem Zeitschritt verringert sich der Abstand zwischen der Schildkröte und Achill, aber er kann sie niemals einholen, denn stets ist sie schon ein winziges Stück weiter, wenn er den Punkt erreicht wo sie im vorigen Moment noch war. Da man dies Argument grenzenlos fortsetzen kann, schloss Zeno, dass Achill die Schildkröte niemals einholen, geschweige denn überholen würde. Selbstverständlich hatte Zeno unzählige male beobachtet, dass ein langsamerer Läufer von einem schnelleren überholt wurde. Was er mit seiner Überlegung zeigen wollte war, dass hier ein Paradox besteht, ein scheinbar unlösbarer Widerspruch zwischen logischem Denken und der Beobachtung.

letzten Wegpunkt der Schildkröte zu erreichen. Diese Vorstellung wäre unschädlich gewesen, wenn er sich zugleich hätte vorstellen können, dass diese unendlich vielen Zeiträume in der Summe eine endliche Zeit ergeben, so wie wir es mit der Infinitesimalrechnung nachweisen können. Weil er aber zu diesem zweiten Schritt nicht in der Lage war, hätte er auch seinen ersten Schritt auf das Glatteis des Unendlichen vermeiden müssen, und seine Argumentation war aufgrund dieser Inkonsistenz falsch.

Nach Vorstellung des Aristoteles war Achill zu keiner Zeit an dem Punkt, den die Schildkröte gerade verlassen hatte. Denn dort zu sein, dass musste ja für Menschen, die sich das unendlich Kleine nicht vorstellen können, bedeuten, dass er sich dort eine endliche Zeit lang aufhielt. Achill hielt sich aber an keinem Punkt des Weges für eine endliche Zeit auf, und ein unendlich kurzer Aufenthalt war nach altgriechischer Vorstellung überhaupt kein Aufenthalt. Also war es unsinnig zu sagen, dass Achill zu diesem Zeitpunkt an dieser Stelle und zu einem anderen Zeitpunkt an einer anderen Stelle war. Er war an keiner dieser Stellen, sondern allenfalls konnte man sagen dass er dort vorbeikam.

Folglich war nur die folgende Sichtweise angemessen: Der Abstand zwischen Achill und der Schildkröte schrumpft kontinuierlich bis auf Null, solange Achill hinter der Schildkröte her rennt, und steigt kontinuierlich wieder an, sobald er sie überholt hat. Entscheidend ist, dass man die Vorstellung der unendlich vielen Orte an denen Achill sich zu unendlichen vielen Zeitpunkten befand, vermeiden musste, solange man nicht in der Lage war diesen Gedanken konsistent zu Ende zu führen.

SCHRÖDINGER: Aristoteles' Scharfsinn beeindruckt mich immer wieder.

BOHR: Zeno hatte sich in Probleme verrannt, weil er versuchte seine Beobachtungen von Wettläufen, und von Vorgängen in Raum und

Zeit überhaupt, in ein Schema ungeeigneter Begriffe zu zwingen. Eine Analogie zur heutigen Situation der Physik kann man darin erkennen, dass wir eine Fülle von Quantenphänomenen beobachten, die sich genauso gegen die Einordnung in ein Verständnis sträuben, das wir traditionell für logisch und vernünftig zu halten gewohnt sind. Auch diesmal scheint mir das Problem nicht darin zu liegen, dass die Phänomene an sich so widersinnig wären, sondern dass wir uns so schwer tun, für die verschiedenen Sachverhalte jeweils den angemessenen Begriffsrahmen zu wählen.

SCHRÖDINGER: Meinen Sie mit der Wahl des „jeweils angemessenen Begriffsrahmens“ das Jonglieren mit gegensätzlichen oder, wie sie zu sagen pflegen, komplementären<sup>18</sup> Begriffen?

BOHR: Was ich meine ist die Wahl des jeweils richtigen formalen Rahmens, das heißt der angemessenen Sprache und der angemessenen Begriffe, für die Analyse von Quantenphänomenen und die Analyse des Messvorgangs. Wenn man Messgeräte als Quantenobjekte beschreibt, dann gelangt man zu absurden Ergebnissen. Dann wird das Messgerät mit dem Quantenobjekt verschränkt, und sein Zeiger zeigt in einer verwaschenen Überlagerung in sämtliche Richtungen. Weil aber kein Mensch jemals ein Messgerät in so einem Überlagerungszustand beobachtet hat, sieht man sich zur Annahme eines Kollapses seiner Zustandsfunktion veranlasst und fragt: Was hat den Kollaps verursacht?

Diese Überlegung ist nicht physikalisch durchdacht und ganz unsinnig. So unsinnig wie Zenos Vorstellung der unendlich vielen Haltepunkte Achills. Wir dürfen das Pferd nicht vom Schwanz aufzäumen. Wenn wir die Phänomene, die wir beobachten, verstehen

---

<sup>18</sup> Der Begriff der „Komplementarität“ spielt in Bohr's Überlegungen zur Quantentheorie eine zentrale Rolle, und er sagt im weiteren Verlauf des Gesprächs noch einiges zu seiner Definition. Leser, denen Bohr's Verwendung dieses Begriffs nicht geläufig ist, sollten ihn an dieser Stelle einfach überlesen.

wollen, dann muss unsere Überlegung beim richtigen Ausgangspunkt beginnen. Und der einzig richtige Ausgangspunkt sind wir selbst. Wenn wir die Augen aufmachen und um uns schauen, dann sehen wir eine klassische Welt. Wir sehen keine Messinstrumente, deren Zeiger verwaschen in sämtliche Richtungen zeigen. Wir sehen keine nebulös überlagerten lebenden und toten Katzen, über deren Zustandsreduktion wir uns Sorgen machen müssten. Die eindeutige, klassische Welt ist uns unmittelbar gegeben, wir brauchen sie nicht durch einen Kollaps aus einer anderen Welt abzuleiten.

Deshalb dürfen wir uns selbst, als Beobachter des Geschehens, und auch die Messgeräte die wir zur Beobachtung eines Quantenobjekts verwenden, mit den Methoden und den Begriffen der klassischen Physik beschreiben. Und zwar von Anfang an, nicht erst nach einem Kollaps. Wir dürfen das nicht nur, wir müssen es sogar. Denn sonst wäre es uns völlig unmöglich, uns über das was bei einem Experiment geschieht in begreifbarer Sprache zu verständigen, und es fände nichts statt, was den Namen „physikalische Beobachtung“ verdient. Nur in der Sprache und mit den Begriffen der klassischen Physik können wir darüber sprechen, welchen apparativen Aufbau wir für unser Experiment verwenden, was wir beim Experiment beobachten, und was wir aus unseren Beobachtungen lernen.<sup>19</sup>

---

<sup>19</sup> Bohrs Überzeugung, dass Messgeräte (und Physiker) stets klassisch beschrieben werden müssen, war Schrödinger natürlich seit Jahren bekannt. Das hielt er aber für einen unfairen Winkelzug der Kopenhagener Deutung, der nach seiner Überzeugung nur dazu diente, die Quantentheorie vor der Absurdität ihrer eigenen Konsequenzen zu schützen. Deshalb stellte er in §10 seines Aufsatzes [1] aus dem Jahr 1935 von Neumann's Beschreibung des Messprozesses, die in Fußnote 15 auf Seite 19 erwähnt wurde, ohne weiteren Kommentar als die quantentheoretische Lehrmeinung dar, und erwähnte die Behandlung des Messprozesses gemäß der Kopenhagener Deutung mit keinem Wort. Auch im hier dokumentierten Gespräch vertritt Schrödinger nachdrücklich die Ansicht, dass Messgeräte mit den gleichen Methoden beschrieben werden müssen wie andere Quantensysteme auch. Siehe besonders Seite 61ff.

SCHRÖDINGER: Wenn ich Sie richtig verstehe, stellen Sie hier eine epistemologische<sup>20</sup> These auf: Sie wollen sagen, dass die klassische Physik der Quantentheorie vorausgehen muss, beziehungsweise dass die Quantentheorie nicht eigenständig verwendet werden kann sondern in die klassische Physik eingebettet werden muss, weil nur die klassische Physik den Fähigkeiten des Denkens und der Sprache von Menschen entspricht.

BOHR: Richtig. Die Begriffe, mit denen unser Gehirn umgehen kann, um sich einen Sachverhalt verständlich zu machen, sind klassische Begriffe. Unser Gehirn verfügt über keine Quantenbegriffe. Das ist ein Ergebnis der Evolution der Menschheit. Deshalb können wir ein klassisches Messgerät verstehen, und wir können aus dem Messergebnis, das es anzeigt, Rückschlüsse auf das Quantensystem ziehen, zu dessen Beobachtung wir das Messgerät verwenden. Wenn wir aber auch die Messgeräte als Quantenobjekte beschreiben, dann gibt es in der Welt keinerlei Ansatzpunkt mehr für unser Erkenntnisvermögen, dann sind wir vollkommen hilflos und können rein garnichts verstehen.

Der erste Schritt zu jeglicher physikalischen Erkenntnis ist deshalb die klassische Beschreibung der Welt, und insbesondere der in ihr enthaltenen Messgeräte. Darauf aufbauend können wir dann im zweiten Schritt Quantenphänomene untersuchen, die in ihre klassische Umgebung eingebettet sind, und mithilfe klassischer Messgeräte unserem Erkenntnisvermögen erschlossen werden. Wer versucht, den zweiten Schritt vor dem ersten zu tun, wird überhaupt nichts verstehen.

SCHRÖDINGER: Dabei gibt es aber ein erhebliches Maß an Willkür. Denn jeder Physiker kann nach Belieben darüber entscheiden, ob er einen makroskopischen Gegenstand als großes Quantensystem

---

<sup>20</sup> Epistemologie: Die Lehre davon, wie menschliches Wissen zustande kommt. Auch als Erkenntnistheorie bezeichnet.

oder als klassisches Messgerät betrachtet will.

BOHR: Ja, bei dieser Frage gibt es einen weiten, aber nicht beliebig großen Spielraum. Egal wie weit man die quantentheoretische Beschreibung ausdehnt, am Ende muss ein klassisch beschriebenes Messgerät stehen. Im Beispiel Ihrer Höllenmaschine bedeutet das: Weil das gesamte Inventar der Kiste, vom radioaktiven Material bis zur Katze, in einem makroskopischen Quantenzustand verschränkt ist, bleibt als klassisch beschriebenes Messgerät nur noch der Beobachter übrig, der den Deckel der Kiste öffnet, hineinschaut, und dadurch den verschränkten Zustand des Inventars reduziert. Die Reduktion erscheint Ihnen in diesem Fall eigenartig oder gar lächerlich, weil Sie nur auf die Katze achten und nicht mehr die Verschränkung mit den zerfallenden Atomkernen bedenken. Indem wir in die Kiste schauen sehen wir, ob bereits ein Atomkern zerfallen ist, oder nicht. Wir erkennen das aufgrund der Verschränkung des radioaktiven Materials mit dem Hammer, der Gift-Ampulle und der Katze, und können dank des eindeutigen Zustands der makroskopischen Bestandteile auch den Zustand des radioaktiven Präparats auf den eindeutigen Zustand „Zerfall ja“ oder „Zerfall nein“ reduzieren.

Die Beschreibung der Katze als Teil eines verschränkten Quantenobjekts ist zulässig, aber unnötig verwirrend. Geschickter wäre es, nur das radioaktive Material quantentheoretisch zu beschreiben, die hintereinander geschalteten Detektoren vom Geigerzähler bis zur Katze aber klassisch. Dann würden wir nur dem radioaktiven Material vor dem Öffnen der Kiste einen Überlagerungszustand von „Zerfall ja“ und „Zerfall nein“ zuordnen, dem Rest des Inventars der Kiste aber einen lediglich uns unbekanntem, jedoch objektiv eindeutigen klassischen Zustand.

### 3. Begriffsverwirrungen

SCHRÖDINGER: Tatsächlich scheint mir ein großer Teil der Verwirrung, die bei der Diskussion über die Quantentheorie auftritt, auf unterschiedliche und nicht immer klar definierte Verwendungen des Begriffs „Zustand“ zurückzuführen zu sein. Als ich vor Jahren die  $\psi$ -Funktion zur Beschreibung des Zustands von Elektronen in die Atomphysik einführte, da wollte ich sie als Dichte eines als Kontinuum aufgefassten Elektronengases interpretieren. Das glückte mir nur bei Atomen mit einem einzigen Elektron. Bei Systemen mit mehreren Elektronen traten Probleme und Widersprüche auf, welche zu überwinden mir trotz intensiver Anstrengung nicht gelang. Soviel ich weiß war es Born<sup>21</sup>, der die  $\psi$ -Funktion dann kurzerhand umwidmete und als Wahrscheinlichkeitsamplitude<sup>22</sup> missbrauchte.

BOHR: Warum wollen Sie Borns glückliche Idee als Missbrauch bezeichnen? Als Wahrscheinlichkeitsamplitude hat sich Ihre  $\psi$ -Funktion seither in zahllosen experimentellen Tests hervorragend bewährt.

SCHRÖDINGER: Weil das die erste und in gewisser Weise grundlegende einer ganzen Reihe von Begriffsverwirrungen war, die seither das Forschungsgebiet der Quantentheorie verseuchen. Im vergangenen Jahrhundert konstruierten die Erfinder der kinetischen Gastheorie

---

<sup>21</sup> Max Born (1882–1972) wurde der Lehrstuhl für Theoretische Physik an der Universität Göttingen entzogen, nachdem das deutsche Parlament 1933 die Macht an die Nazis übergeben hatte. Von 1933 bis 1936 arbeitete er als „Stokes-Lecturer“ an der Universität Cambridge. Dann wurde er auf einen Lehrstuhl der Universität Edinburgh berufen, wo er bis 1953 blieb.

<sup>22</sup> Diese Interpretation der  $\psi$ -Funktion, die vielleicht Borns bedeutendste Entdeckung darstellt, findet sich kurioserweise nur in einer bei der Korrektur des Vorabdrucks nachträglich eingefügten Fußnote seiner Publikation. Im Text selbst interpretiert er die  $\psi$ -Funktion, aber nicht ihr Quadrat, als Wahrscheinlichkeit. M. Born: *Zur Quantenmechanik der Stoßvorgänge*, Zeits. Phys. **37**, 863–867 (1926), <http://dx.doi.org/10.1007/BF01397477>

ein Modell, in dem die Bestandteile des Gases winzig kleine Kügelchen sind, deren jedes einzelne zu jeder Zeit einen wohlbestimmten Ort und einen wohlbestimmten Impuls hat. Die Gesamtheit der Orte und Impulse wurde als „Zustand“ des Gases bezeichnet. Die Forscher glaubten keineswegs, dass diese Parameter tatsächlich messbar wären. Vielmehr berechneten sie mithilfe statistischer Methoden aus dem hypothetischen Zustand des Modells andere Parameter wie Druck oder Temperatur des Gases, und erst diese abgeleiteten Parameter des klassischen Modells sind der experimentellen Überprüfung zugänglich. Die Reihenfolge war also: Erstens hypothetischer Zustand eines Modells, zweitens Anwendung statistischer Methoden, drittens abgeleitete und experimentell überprüfbare Größen wie Druck oder Temperatur. Die gegenwärtig bekannte Quantenmechanik stellt dieses Konzept auf den Kopf. Einerseits interpretiert sie das klassische Modell so wörtlich, wie seine Erfinder es nie gewagt haben, indem sie glaubt dass die Orte und Impulse der atomaren Bestandteile im Prinzip gemessen werden könnten. Andererseits postuliert sie aber, dass nur die Hälfte dieser Parameter gleichzeitig einen exakten Wert habe. Die Statistik tritt in Kraft, wenn man Vorhersagen über die andere Hälfte der Primärparameter machen will.

Die Forscher der klassischen Periode zweifelten nicht daran, dass die Experimentatoren die Präzision ihrer Messungen unbegrenzt weiterentwickeln und damit früher oder später die Theoretiker zwingen würden, ihr Modell zu verbessern, um die genaueren Messdaten angemessen repräsentieren zu können. Die derzeitige Quantentheorie benutzt, nein, sie missbraucht das gleiche Modell, um die Grenzen der Genauigkeit künftiger Messungen zu bestimmen und Barrieren gegen die Fortentwicklung der Naturwissenschaft aufzurichten.

Bohr nuckelt nervös an seiner Pfeife.

SCHRÖDINGER: Wenn man der Meinung ist, dass es sich bei den Quantenphänomenen um ganz neuartige Erscheinungen handelt, die keinesfalls mit den Methoden der klassischen Physik erfassbar sind – und ich bin durchaus dieser Meinung –, sollte man dann nicht versuchen, eine von Grund auf neuartige Physik mit angemessenen Werkzeugen und Begriffen zu entwickeln? Stattdessen verbiegt die derzeitige Quantentheorie die klassischen Begriffe bis ins Groteske, um die Quantenphänomene doch noch irgendwie in die Spanischen Stiefel eines Modells zu zwängen, das zu einem ganz anderen Zweck erdacht wurde. Wäre es nicht geradezu ein Ergebnis prästabilisierter Harmonie, wenn die Forscher der klassischen Epoche ein Modell ersonnen hätten, das genau entgegengesetzt zu ihrer Intention dazu geeignet wäre, die Grenzen der Messbarkeit bei einem Objekt wie dem Wasserstoffatom festzulegen?

BOHR: Quantenphänomene sind von vollkommen anderer Art als die Phänomene, die der Entwicklung der klassischen Physik zugrunde lagen. Darin stimme ich Ihnen uneingeschränkt zu. Aber wir sind nicht vollkommen andere Menschen als es die Forscher der vergangenen Jahrhunderte waren. Deshalb können die Konzepte und Begriffe der Quantentheorie auch nicht vollkommen andere sein als die Konzepte und Begriffe der klassischen Physik. Aufgrund der Evolution der Menschheit passt unser Erkenntnisvermögen häufig – aber keineswegs immer – recht gut zu den Phänomenen, mit denen sich die klassische Physik befasste. Und es passt wesentlich schlechter zu Quantenphänomenen, weil es für das Überleben unserer Vorfahren ziemlich belanglos war, ob sie beispielsweise das Spektrum des Wasserstoffatoms verstehen und berechnen konnten, oder nicht.

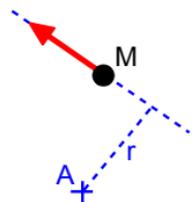
SCHRÖDINGER: Aber auch die allermeisten Begriffe der klassischen Physik haben in der Evolution der Menschheit keine Rolle gespielt, sondern wurden erst in der Neuzeit definiert. Und zwar zweckmäßig

und wohlüberlegt definiert im Rahmen einer Modellvorstellung, die man sich von der Realität machte. Nehmen Sie als einfaches Beispiel den Drehimpuls. Im klassischen Modell kann er ein Kontinuum von Werten annehmen. Das liegt keineswegs nur daran, dass das klassische Modell allzu grob wäre, indem es das Planck'sche Wirkungsquantum als vernachlässigbar klein betrachtet. Sondern der klassische Drehimpuls ist allein schon deshalb eine kontinuierliche Größe, weil der Aufpunkt, relativ zu dem der Drehimpuls gemessen wird, kontinuierlich verschiebbar ist.<sup>23</sup> Denn beim Aufpunkt handelt es sich ja nur um einen gedachten Punkt, eine Koordinate, nicht etwa um einen physikalisch festgelegten Punkt. Es gehört demnach zur klassischen Definition des Begriffs Drehimpuls, dass es sich um eine kontinuierliche Größe handelt. Wenn die Quantenmechanik quantisierte Drehimpulse postuliert, dann zwingt sie doch offenbar einen Sachverhalt von völlig neu- und andersartiger Charakteristik in den unpassenden klassischen Begriff des Drehimpulses. Und das ist kein Einzelfall. Wohin man auch schaut, entdeckt man in der heutigen Quantentheorie Begriffe und Konzepte, die der klassischen Theorie entlehnt, zweckentfremdet, und bis ins Unsinnige verdreht werden.

BOHR: Im Fall von Observablen<sup>24</sup> halte ich es nicht nur für zulässig sondern sogar für notwendig, in der Quantentheorie die klassischen Begriffe weiter zu verwenden. Denn im Fall großer Quantenzahlen haben diese Größen ja in der Quantentheorie den gleichen Zahlen-

<sup>23</sup> Der Körper mit der Masse  $M$  bewegt sich, wie durch den roten Pfeil angedeutet, mit der Geschwindigkeit  $v$  entlang der gestrichelt gezeichneten geraden blauen Linie, die im Abstand  $r$  am Aufpunkt  $A$  vorbeiführt. Der Drehimpuls des Körpers ist

$$\text{Drehimpuls} = r \cdot v \cdot M .$$



<sup>24</sup> Observable = messbare Größe

wert wie in der klassischen Theorie.<sup>25</sup> Anders verhält es sich beim Begriff des Zustands bzw. der Zustandsfunktion. Vielleicht wäre es besser und weniger missverständlich gewesen, wenn wir uns von Anfang an auf ein Wort wie „Wahrscheinlichkeitsamplitude“ oder einfach „ $\psi$ -Funktion“ geeinigt hätten, für das es in der klassischen Physik kein Gegenstück gibt. Denn hierbei handelt es sich ja wirklich insofern um ein völlig neuartiges Konstrukt, als erstmals in einer physikalischen Theorie die Kenntnis des Beobachters in die Beschreibung des Objekts mit einbezogen wird. Und diese Kenntnis wird wiederum wesentlich beeinflusst durch die Einschränkung der gleichzeitigen Messbarkeit kanonisch konjugierter Variabler, wie sie durch Heisenbergs Unbestimmtheitsrelationen formuliert wird.

#### 4. Spukhafte Fernwirkung

SCHRÖDINGER: Diese Einschränkung gilt nur für die direkte Messung an einem Quantenobjekt. Man kann sich Kenntnisse über die dynamischen Größen von Quantenobjekten aber auch auf indirekte Weise verschaffen. Indem man sich nämlich die Korrelationen zwischen den Bestandteilen verschränkter Quantensysteme zunutze macht. Das ist ja der Clou des Artikels, den Einstein und Mitarbeiter letztes Jahr in der *Physical Review* veröffentlicht haben.<sup>26</sup> Es war übrigens dieser Artikel, der mich auf die Idee mit dem Katzenexperiment gebracht hat. Denn nirgendwo kommt der

---

<sup>25</sup> Das ist der Inhalt des von Bohr aufgestellten Korrespondenzprinzips, das sich in den Anfangsjahren der Quantenmechanik als nützliche Leitlinie bewährte.

<sup>26</sup> Schrödinger meint einen Artikel von Albert Einstein, Boris Podolski, und Nathan Rosen, der am 15. Mai 1935 veröffentlicht wurde [2]. Die Autoren untersuchen ein aus zwei Punktteilchen bestehendes System. Das eine Teilchen wird durch die dynamischen Variablen  $p$  und  $q$  beschrieben, das andere durch die dynamischen Variablen  $P$  und  $Q$ . Es handelt sich um kanonisch konjugierte Variable, so dass nach den Regeln der Quantenmechanik weder die beiden Variablen  $q$  und  $p$  noch die beiden Variablen  $Q$  und  $P$  gleichzeitig genau

Widersinn und die Unzulänglichkeit der derzeit bestehenden Quantentheorie deutlicher zum Vorschein, als bei den verschränkten Zustandsfunktionen. Einstein hat die Verschränkung genutzt, um die Unvollständigkeit dieser Theorie nachzuweisen. Denn in einem System von zwei korrelierten Teilchen kann man entweder eine präzise Ortsmessung des ersten Teilchens durchführen, und dann mit Wahrscheinlichkeit  $W = 1$  voraussagen, welches Ergebnis eine präzise Ortsmessung des korrelierten zweiten Teilchens haben wird. Oder man kann den Impuls des ersten Teilchens genau messen, und dann mit Wahrscheinlichkeit  $W = 1$  das Ergebnis einer präzisen Impulsmessung des zweiten Teilchens voraussagen. Und wenn man das genaue Ergebnis einer Messung mit Wahrscheinlichkeit Eins voraussagen kann ohne dem zweiten Teilchen mit einem Messgerät auch nur nahe zu kommen, dann hat dieses Teilchen doch offenbar

---

definierte Werte haben. Vielmehr gilt Heisenbergs Unbestimmtheitsrelation

$$\Delta q \cdot \Delta p \geq \frac{\hbar}{2} \qquad \Delta Q \cdot \Delta P \geq \frac{\hbar}{2} .$$

Wenn die beiden Teilchen in geeigneter Weise miteinander wechselwirken, und anschließend voneinander getrennt und weit entfernt sind, dann können sie sich in einem verschränkten Zustand derart befindenden, dass man mit Sicherheit weiß:

\* Wenn am ersten Teilchen  $q$  gemessen wird, dann muss für das zweite Teilchen  $Q = q + q_0$  mit einer gewissen, bekannten Konstanten  $q_0$  gelten.

\* Wenn am ersten Teilchen  $p$  gemessen wird, dann muss für das zweite Teilchen  $P = -p$  gelten.

Die Autoren schließen daraus, dass exakte Werte von  $Q$  und  $P$  nicht erst durch die Messung entstehen – denn das zweite Teilchen wird durch die Messungen am ersten Teilchen nicht berührt – sondern dass das zweite Teilchen exakte Werte beider Parameter bereits vor der Messung und unabhängig von der Messung besitzt, dass exakte Werte der kanonisch konjugierten Parameter  $Q$  und  $P$  also gleichzeitig Bestandteile der objektiven Realität sind. Weil sie aber nicht beide gleichzeitig durch exakte Variable der Quantentheorie repräsentiert werden, erklären Einstein, Podolski und Rosen die Quantentheorie für unvollständig.

schon vor der Messung, und unabhängig von der Messung, einen wohldefinierten Wert dieser Variablen. Weil es uns zudem frei steht, entweder den Ort oder den Impuls des ersten Teilchens präzise zu messen, und auf diese Weise entweder den Ort oder den Impuls des korrelierten zweiten Teilchens genau vorherzusagen, muss das zweite Teilchen unabhängig von der Messung sogar präzise Werte beider Variabler besitzen. Also muss eine vollständige Quantentheorie, anders als die derzeit existierende Quantentheorie, auch präzise Werte beider Variabler enthalten.<sup>27</sup>

---

<sup>27</sup> Zuweilen muss man sich wundern, wie begriffsstützig selbst so herausragende Forscher und Denker wie Schrödinger, Einstein und Bohr – und alle ihre Zeitgenossen! – zuweilen sein können. Gerade hat Schrödinger noch – mit Zustimmung von Bohr – festgestellt, dass zufolge der Quantentheorie niemals zwei kanonisch konjugierte Größen eines Quantenobjekts gleichzeitig einen wohldefinierten Wert haben können. Und er hat das Vibrationsspektrum zweiatomiger Moleküle als experimentell prüfbares Beispiel genannt. In seiner Veröffentlichung [1] formulierte er dasselbe wenige Monate vorher auf Seite 811 rechte Spalte oben so: „wenn ich dem Modell in jedem Augenblick einen bestimmten (mir bloß nicht genau bekannten) Zustand zuschreiben wollte oder (was dasselbe ist) *allen* Bestimmungsstücken bestimmte (mir bloß nicht genau bekannte) Zahlwerte, so ist keine Annahme über diese Zahlwerte *denkbar*, die nicht mit einem Teil der quantentheoretischen Behauptungen im Widerspruch stünde.“ Und nun stellt er fest, dass zufolge der Arbeit von Einstein, Podolski und Rosen kanonisch konjugierte Größen eines Quantenobjekts eben doch bestimmte (uns bloß nicht genau bekannte) Zahlwerte haben müssen. Zusammengenommen bedeuteten diese beiden Gedanken offensichtlich: Wenn man die Quantentheorie im Sinne von Einstein, Podolski und Rosen vervollständigt, dann muss die vervollständigte Quantentheorie unvermeidlich „mit einem Teil der quantentheoretischen Behauptungen im Widerspruch“ stehen. Die „vervollständigte“ Quantentheorie wird zwangsläufig nicht nur zusätzliche, sondern auch *andere* Aussagen über den Ausgang von Experimenten machen als die 1936 bekannte Quantentheorie. Und wenn zwei Theorien unterschiedliche Voraussagen machen, dann kann mindestens eine von ihnen experimentell widerlegt werden. Einstein, Podolski und Rosen haben plädiert, dass die Quantentheorie zwar richtig zu sein scheine, soweit ihre Aussagen reichen, dass sie aber unvollständig sei. Die korrekte Schluss-

BOHR: Ich meine nicht, dass dieser vermeintliche Beweis der Unvollständigkeit zutreffend ist.<sup>28</sup> Die Korrelation ändert nichts daran, dass es sich hier um ein „entweder oder“ handelt, aber nicht um ein „sowohl als auch“. Wir müssen uns auch in diesem Fall entscheiden, welche der beiden Variablen wir am ersten Teilchen präzise messen und dann für das zweite Teilchen voraussagen wollen. Die kanonisch konjugierte Variable bleibt auch im System zweier korrelierter Teilchen undefiniert.

SCHRÖDINGER: Das ist richtig, geht aber an Einsteins Argument vorbei.<sup>29</sup> Im verschränkten System können die beiden Teilchen *sehr* weit voneinander entfernt sein. Auf welche Weise sollte denn der Zustand des zweiten Teilchens beeinflusst werden, wenn man an der Apparatur zur Beobachtung des ersten Teilchens eine Änderung

---

folgerung aus ihren Überlegungen ist jedoch offensichtlich die folgende Alternative: *Entweder muss die Quantentheorie nicht nur unvollständig, sondern experimentell nachprüfbar falsch sein. Oder aber sie muss vollständig, und jede im Sinne von Einstein, Podolski und Rosen „vervollständigte“ Theorie experimentell nachprüfbar falsch sein.* Obwohl den Physikern 1936 beide Voraussetzungen für diesen Schluss zur Verfügung standen, und obwohl Schrödinger im hier berichteten Gespräch beide Voraussetzungen explizit ausspricht, dauerte es noch fast drei Jahrzehnte, bis John Stewart Bell (1928-1990) diesen Sachverhalt 1964 endlich bemerkte [J. S. Bell: *On the Einstein Podolski Rosen Paradox*, Physics 1, 195-200 (1964), [https://cds.cern.ch/record/111654/files/vol1p195-200\\_001.pdf](https://cds.cern.ch/record/111654/files/vol1p195-200_001.pdf)]. Und es dauerte nochmals fast ein Jahrzehnt, bis die Alternative experimentell entschieden wurde: Die Quantentheorie ist vollständig, und jede im Sinne von Einstein, Podolski und Rosen „vervollständigte“ Theorie ist falsch.

<sup>28</sup> Bohr verfasste eine Entgegnung [3] auf den Artikel von Einstein, Podolski, und Rosen, die am 15. Oktober 1935 veröffentlicht wurde. Bohr hat seine im Gespräch mit Schrödinger vorgebrachten Überlegungen in verschiedenen Vorträgen und Aufsätzen ausführlicher dargelegt, die teilweise früher, teilweise später datiert sind als das Gespräch mit Schrödinger am 17. Juli 1936. Einige dieser Aufsätze wurden in deutscher Übersetzung veröffentlicht [4, 5].

<sup>29</sup> Wieviel besser hätte Bohr's Antwort [3] werden können, wenn ein hilfreicher Referee ihm diesen Hinweis gegeben hätte!

vornimmt? Bedenken Sie, dass diese Wirkung ohne Zeitverzögerung, schneller als das Licht, vom einen zum anderen Teilchen übertragen werden müsste. Wenn der Ort des ersten Teilchens genau gemessen wird, dann bekommt zufolge der derzeit herrschenden Quantentheorie das zweite Teilchen augenblicklich einen wohldefinierten Ort, wenn der Impuls des ersten Teilchens genau gemessen wird, dann bekommt das zweite Teilchen augenblicklich einen wohldefinierten Impuls. Das ist die Wiederkehr einer spukhaften Fernwirkung, die doch durch die Relativitätstheorie gerade erst glücklich aus der Physik exorziert wurde.

BOHR: Der Begriff „Wirkung“ ist in diesem Fall nicht angemessen, denn es wird weder Energie noch Impuls noch Information zwischen den korrelierten Teilchen übertragen.<sup>30</sup>

SCHRÖDINGER: Nun gut. Also keine echte Fernwirkung. Aber eben doch ein kausaler Zusammenhang, der instantan wirksam ist. Die Messung am ersten Teilchen hat ohne irgend eine Zeitverzögerung die Folge, dass das zweite Teilchen einen wohldefinierten Wert der entsprechenden Variablen bekommt. Nach den Grundsätzen der lokalen Feldtheorie könnte eine Messung am ersten Teilchen den Zustandsvektor des zweiten Teilchens eben nicht instantan festlegen, sondern nur retardiert<sup>31</sup>, nämlich frühestens nach der Zeit, die das Licht braucht um den Weg zwischen beiden Teilchen zurückzulegen.

BOHR: Nein. Man darf sich das Quantensystem zweier korrelierter Teilchen nicht so vorstellen wie ein klassisches System zweier klas-

---

<sup>30</sup> Der Begriff „Wirkung“ hat in der Physik eine etwas andere Bedeutung als in der Alltagssprache. Bohr scheint hier allerdings allzu penibel zu sein. Aus den folgenden Sätzen wird nämlich erkennbar, dass Schrödinger gar nicht die Wirkung im engeren physikalischen Sinne meint, sondern so etwas wie „Auswirkung“ oder „Konsequenz“.

<sup>31</sup> (lateinisch) retardiert = verzögert

sischer Teilchen. Es ist ein ganz entscheidender Punkt, dass wir Quantenphänomene als individuelle – im wortwörtlichen Sinn unteilbare – Gesamtheiten auffassen müssen.<sup>32</sup> Das gilt auch für das System der beiden korrelierten Teilchen. Aufgrund seiner Individualität wird das Phänomen in der Quantentheorie zu Recht durch eine einzige Zustandsfunktion repräsentiert. Wenn diese Zustandsfunktion durch die Verschränkung mehrerer Teil-Zustandsfunktionen gebildet wird, dann ist das nur eine formale Maßnahme auf dem Papier des Theoretikers. Nur die verschränkte Gesamt-Funktion repräsentiert das Quantensystem, während die Teil-Funktionen nicht als Repräsentanten von irgend etwas „da draußen“ betrachtet werden können.<sup>33</sup> Selbstverständlich können wir dies Quanten-

<sup>32</sup> (lateinisch) individuell = unteilbar

<sup>33</sup> Im Umkehrschluss impliziert Bohrs Formulierung, dass er die verschränkte Gesamt-Zustandsfunktion sehr wohl als Repräsentant von „etwas da draußen“ betrachtet. Das scheint dem Bericht von A. Petersen (Bull. Atom. Sci. 9, 8–14, Sept. 1963, <https://books.google.de/books?id=DgcAAAAAMBAJ&pg=PA8>) zu widersprechen, nach dem Bohr einmal im Gespräch geäußert habe: “There is no quantum world.” Aus dem Zusammenhang des (lesenswerten!) Artikels gerissen, wird dieser Satz oft missverstanden. Tatsächlich beschreibt Petersen die Ansichten Bohrs über Realität und Sprache wesentlich differenzierter: “Traditional philosophy has accustomed us to regard language as something secondary and reality as something primary. Bohr considered this attitude toward the relation between language and reality inappropriate. When one said to him that it must be reality which, so to speak, lies beneath language, and of which language is a picture, he would reply, ‘We are suspended in language in such a way that we cannot say what is up and what is down. The word reality is also a word, a word which we must learn to use correctly.’ Bohr was not puzzled by ontological problems or by questions as to how concepts are related to reality. Such questions seemed sterile to him.” Aus Petersens Bericht wird deutlich, dass Bohr auch in seinen späteren Lebensjahren die gleiche Überzeugung vertrat wie 1936 im Gespräch mit Schrödinger: Bohr hielt die Frage nach der „Realität“ physikalischer Objekte für sekundär und letztlich irrelevant. Primär war nach seiner Ansicht die Frage ob Menschen über diese physikalischen Objekte sinnvoll sprechen können. Jenes „etwas da draußen“ und die zu

phänomen jederzeit dadurch teilen, dass wir seine einzelnen Bestandteile mithilfe geeigneter Messgeräte aus dem Gesamtverbund heraustrennen. Aber dann handelt es sich um ein beziehungsweise mehrere andere Phänomene, nicht mehr um dasjenige, das wir anfangs untersuchen wollten. Solange das Quantensystem nicht mithilfe von Messgeräten aufgetrennt wurde, ist die Vorstellung von Teilen dieses Phänomens, und Abständen zwischen den Teilen, nicht physikalisch durchdacht.<sup>34</sup>

Sie sagen, die beiden Teilchen seien weit voneinander entfernt. Woher wollen Sie das wissen? Bevor nicht mindestens eines der Teilchen mithilfe einer geeigneten Messapparatur lokalisiert wird, können wir nicht sinnvoll über den Ort der Teilchen sprechen, und wir können auch nicht sagen, sie seien weit voneinander entfernt.

Wenn wir nun eine Ortsmessung durchführen und das eine Teilchen an einem scharf definierten Ort detektieren, dann verwenden wir erstens eine Messapparatur, die eine gleichzeitige Messung des Impulses ausschließt, und zweitens erhalten wir aufgrund der Korrelation zwischen beiden Teilchen instantan die Information über den Ort des zweiten Teilchens, der eventuell sehr weit vom Ort des ersten Teilchens entfernt sein kann. Daran ist nichts geheimnisvolles oder widersprüchliches. Im Gegenteil, die Information über

---

seiner Beobachtung verwendeten Messgeräte bilden zusammengenommen das individuelle Quantenphänomen; nur über dieses können Physiker sinnvoll sprechen, nur dieses hält er für ein legitimes Objekt physikalischer Untersuchungen. Die Frage, ob jenes „etwas da draußen“ *ohne* den Rahmen der klassisch beschriebenen Messgeräte real existiere, hat Bohr niemals mit ja oder nein beantwortet, weil er eine Antwort für sinnlos und einen Missbrauch der Sprache hielt.

<sup>34</sup> Indirekt weist Bohr hier nochmals darauf hin, dass die verschränkte Gesamtzustandsfunktion von Schrödingers Höllenmaschine weder die Überlagerung von einem zerfallenen und einem nicht zerfallenen Atomkern, noch die Überlagerung von einer toten und einer lebenden Katze beschreibt, sondern ausschließlich das Gesamtsystem. Schrödinger hat auch nie etwas anderes behauptet.

das weit entfernte zweite Teilchen ist überhaupt kein neuartiger Quanteneffekt, sondern Ausdruck einer Korrelation, wie sie aus der klassischen Physik altbekannt ist. Wenn Sie unterwegs Ihre Handschuhe anziehen wollen und in Ihrer Manteltasche nur den rechten Handschuh finden, dann wissen Sie instantan, dass der Handschuh, der zuhause auf der Garderobe liegen geblieben ist, ein linker ist. Sie wissen das ohne Zeitverzögerung, egal wie weit Sie von der heimischen Garderobe entfernt sind.<sup>35</sup>

SCHRÖDINGER: Der wesentliche Unterschied ist, dass der linke Handschuh bereits ein linker Handschuh war, bevor ich sein Fehlen bemerkte. Aber beim Ort eines Quantenteilchens soll ich glauben, dass er schlichtweg nicht existiert, bevor er durch eine Messung festgestellt wird.

BOHR: Richtig, dies ist die Belehrung, die wir bei der Untersuchung der Quantenphänomene empfangen haben. Wenn der Ort eines Quantenteilchens nicht durch eine Messung festgestellt wurde, dann dürfen wir nicht sagen: „Nun ja, der Ort des Teilchens ist uns zwar unbekannt, aber irgend einen wohldefinierten Ort wird es ja wohl haben.“ Bei der Diskussion klassischer Phänomene ist eine derartige Annahme unschädlich. Aber bei der Diskussion eines Quantenphänomens wie der Interferenz eines Teilchens im Doppelspaltexperiment geraten wir mit dieser Annahme in Widerspruch zur experimentellen Beobachtung. Diese Besonderheit, durch die sich die Quantentheorie fundamental von der klassischen Theorie unterscheidet, ist bereits bei der Messung am ersten Teilchen wirksam. Um auf diese bemerkenswerte Eigenart der Quanten-

---

<sup>35</sup> Genau wie in seiner schriftlichen Antwort [3] verirrt Bohr sich auch im Gespräch mit Schrödinger immer wieder in weitschweifigen Nebengedanken, statt präzise auf Einsteins Argument – nämlich die rätselhafte Fern-Korrelation innerhalb verschränkter Quantensysteme – einzugehen. Zum Glück lässt Schrödinger nicht locker, und fragt hartnäckig weiter nach.

theorie hinzuweisen, hätte es des zweiten Teilchens in Einsteins Gedankenexperiment nicht bedurft.

SCHRÖDINGER: Wenn ich glauben soll, dass das Teilchen vor der Ortsmessung keinen Ort hat, dann heißt das doch wohl, dass sein Ort durch die Messung erschaffen wird. Das Messgerät übt eine Wirkung auf das Teilchen aus, die dem Teilchen einen Ort verleiht. Das zu glauben ist schon schwer genug. Aber nun verleiht die Wechselwirkung des Messgeräts mit dem ersten Teilchen nicht nur diesem einen wohldefinierten Ort, sondern auch dem zweiten Teilchen, das, wie sich in diesem Moment herausstellt, vom ersten Teilchen und auch vom Messgerät, das sich am ersten Teilchen zu Schaffen macht, sehr weit entfernt ist. Bei der ortsschaffenden Wirkung des Messgeräts kann es sich nur im Fall des ersten Teilchens um Nahewirkung handeln. Die Erschaffung des Ortes des zweiten Teilchens ist zwar keine Fernwirkung im strengen physikalischen Sinn dieses Begriffs, aber doch eine nicht retardierte Folge der Messung am ersten Teilchen, und deshalb unverträglich mit den grundlegenden Annahmen der lokalen Feldtheorie.

Ihr Gegenargument habe ich durchaus verstanden.<sup>36</sup> Es steht und fällt mit der Annahme, dass das aus zwei Teilchen bestehende verschränkte Quantensystem – unabhängig von seiner räumlichen Ausdehnung – als untrennbare Einheit betrachtet werden muss. Wenn das so sein sollte, dann kann natürlich auch eine Messung an irgendeinem lokalen Punkt dieser untrennbaren Einheit eine Veränderung der gesamten untrennbaren Einheit bewirken, die sich an jedem anderen lokalen Punkt der untrennbaren Einheit

---

<sup>36</sup> Es ist schade, dass es Schrödinger nicht gelungen ist, Bohr ein wirklich glasklares Statement zum Lokalitätsprinzip, beziehungsweise der Nichtlokalität der Quantentheorie, zu entlocken. Man darf aber wohl sagen, dass Schrödinger in den folgenden Sätzen Bohr's Position in fairer Weise wiedergibt. Tatsächlich widerspricht Bohr ja auch nicht, sieht sich also offenbar im Wesentlichen richtig verstanden.

auswirkt. Und zwar augenblicklich, ohne irgend eine Retardierung. Denn wenn sich die Korrelation im gemessenen System nur mit endlicher Geschwindigkeit – zum Beispiel mit der Geschwindigkeit des Lichts – auswirken würde, dann wäre es keine untrennbare Einheit in dem von Ihnen gemeinten Sinn.

Ich bin jedoch überzeugt<sup>37</sup> dass diejenigen Objekte der physikalischen Forschung, die sich zu einer bestimmten Zeit an unterschiedlichen Orten befinden, auch unabhängig voneinander wirklich real existieren, und deshalb in einer vollständigen physikalischen Theorie getrennt voneinander beschrieben werden müssen, aber nicht als delokalisiertes Gesamt-Objekt. Ohne diese Annahme der unabhängigen Existenz aller Dinge, die räumlich getrennt sind, wäre physikalisches Denken, so wie wir es gewohnt sind, schlechthin unmöglich. Ich kann auch nicht erkennen, wie Naturgesetze ohne eine klare Abgrenzung räumlich getrennter Dinge überhaupt formuliert werden könnten.<sup>38</sup>

Ihr Begriff des „individuellen Quantenphänomens“ verleiht der Theorie einen nichtlokalen Charakter, mit dem Sie sich eindeutig vom strikten Lokalitätsprinzip der Feldtheorie verabschieden. Soweit ich das auf die Schnelle überblicken kann ist ihre Position nicht zu widerlegen, wenn man bereit ist diese Nicht-Lokalität zu akzeptieren. Ich sage Ihnen frank und frei, dass ich dazu nicht bereit

---

<sup>37</sup> In seinen folgenden Sätzen verwendet Schrödinger nahezu die gleichen Worte, mit denen Einstein in einem 1948 veröffentlichten Artikel die Notwendigkeit eines strengen Lokalitätsprinzips in der physikalischen Theorie betonte: A. Einstein: *Quanten-Mechanik und Wirklichkeit*, *Dialectica* **2**, 320–324 (1948) <http://dx.doi.org/10.1111/j.1746-8361.1948.tb00704.x>

<sup>38</sup> Man könnte einwenden, dass mit der Quantentheorie doch ein Beispiel für eine Theorie „ohne klare Abgrenzung räumlich getrennter Dinge“ existiert. Die Lösung des Widerspruchs liegt wahrscheinlich im Begriff „Dinge“, der auf Quantenobjekte nicht wirklich zutrifft. Zum Beispiel wird die Thermodynamik von Dingen durch die Maxwell-Boltzmann-Statistik bestimmt, die Thermodynamik von Quanten aber durch die Fermi-Dirac- oder die Bose-Einstein-Statistik.

bin. Und ich weiß, dass Einstein das ebenfalls nicht akzeptiert.

BOHR: Wie einfach wäre es, wenn Einstein noch in Berlin wäre. Ich könnte morgens in den Zug einsteigen, und nachmittags säßen wir schon gemeinsam am Kaffeetisch. Nicht dass ich mir einbilde, ich könnte ihn von meinen Ansichten überzeugen. Das konnte ich bei früheren Begegnungen auch nicht, dafür sind unsere Betrachtungsweisen in einigen fundamentalen Punkten einfach zu verschieden. Aber ich habe wenige Gesprächspartner gefunden, die mir so geholfen haben meinen eigenen Standpunkt zu klären und weiter zu entwickeln, wie Einstein. In Amerika ist er einfach elend weit weg, und schriftliche Kommunikation ist kein vollwertiger Ersatz. Es ist wirklich unfassbar, dass die Deutschen ihre besten Köpfe aus dem Land vergraulen. Sie hier in Oxford, Einstein in Princeton, morgen reise ich weiter nach Cambridge, um Born zu treffen. Und so viele andere Kollegen über die ganze Welt verstreut. Wenn Dummheit schmerzhaft wäre, dann müssten wir uns in Dänemark den ganzen Tag die Ohren zuhalten, so laut würde das Wehgeschrei über die deutschen Grenzen herüber dringen. Born schrieb mir übrigens, dass seine Anstellung in Cambridge zeitlich befristet ist. Wie ist Ihre Situation?

SCHRÖDINGER: Mein Lehrauftrag ist ebenfalls befristet. Ich bin im Gespräch mit der Universität Graz. Vielleicht wird was draus.

BOHR: In Österreich wären sie von Norden und von Süden von faschistischen Nachbarn eingekeilt. Haben Sie keine Sorge, dass der Bazillus überspringen könnte?

SCHRÖDINGER: Die Sorge kann man schon haben. Andererseits könnte gerade das abstoßende Beispiel des Faschismus vor ihrer Haustür meine österreichischen Landsleute gegen diesen Ungeist immunisieren.<sup>39</sup>

---

<sup>39</sup> Die Naivität genialer Wissenschaftler auf politischem Terrain ist immer

Bohr's Rauchwolken werden immer dicker. Schrödinger öffnet das Fenster. Es ist ein schöner Sommertag.

BOHR: Ich weiß, dass qualmende Gäste im Büro nicht wirklich angenehm sind. Wollen wir nicht für ein paar Schritte rausgehen? Wenn ich es richtig gesehen habe, beginnen gleich hinter dem Campus die Wiesen.

Wenige Minuten später schlendern die beiden Männer auf dem Kiesweg neben dem Bach entlang. Das Universitätsgelände liegt hinter ihnen, ab und zu werden zwischen den Büschen in der Ferne die Türme der Stadt sichtbar.

SCHRÖDINGER: Sie haben das gute Wetter mitgebracht. Es ist der schönste Tag seit Wochen.

## 5. Der Ast, auf dem wir sitzen

BOHR: Warum ist es Ihnen und Einstein so wichtig, Quantensystemen genau definierte Werte für kanonisch konjugierte Variable gleichzeitig zuzuordnen, obwohl wir uns doch einig sind dass – wie durch Heisenbergs Unbestimmtheitsrelationen beschrieben – nur jeweils einer davon präzise gemessen werden kann?

SCHRÖDINGER: Der Wunsch nach einer vollständigeren Quantentheorie beruht auf der Hoffnung – ich möchte sogar sagen auf der Erwartung –, dass eine Theorie, in der alle dynamischen Para-

---

wieder verblüffend. Schrödinger ist in dieser Hinsicht kein Einzelfall. Zum Beginn des Wintersemesters 1936/37 wurde er auf den erhofften Lehrstuhl nach Graz berufen. Aber schon 1938 holtten die Nazis ihn dort ein. Nach mehreren Verhören durch die GeStaPo flohen Schrödinger und seine Frau aus Österreich, getarnt als Urlaubsreisende mit nur einem Handkoffer als Gepäck. Nach kurzen Aufenthalten an der Universität Oxford und der Universität Gent wurde Schrödinger 1940 ans Institute for Advanced Studies nach Dublin berufen, wo er bis 1956 blieb.

meter wohldefinierte, wenn auch möglicherweise uns unbekannte Werte haben, auch zu eindeutigen Ergebnissen führen wird. Wenn diese Theorie gefunden ist, dann brauchen Sie nicht mehr ständig Quantentheorie und klassische Theorie zusammenzustöpseln, um eine Beobachtung theoretisch zu erfassen, sondern können den gesamten Vorgang mit einer einheitlichen, konsistenten Theorie beschreiben. Ich erwarte nicht, dass diese künftige Theorie Heisenbergs Unbestimmtheitsrelationen in Frage stellen wird. Aber ich erwarte dass allein schon die Annahme, dass alle Parameter eines Quantensystems an sich wohldefinierte Werte haben, selbst wenn nur die Hälfte davon genau gemessen werden kann und über die andere Hälfte nur statistische Vermutungen angestellt werden können, zwangsläufig zu einer Beschreibung führen muss die uns tot-lebendige Katzen und ähnlichen Unfug erspart.

An sich ist diese Situation doch gar nicht so neu. Auch die klassische Physik macht unendlich präzise Aussagen über unzählige Parameter, von denen nur ein winzig kleiner, endlicher Teil mit endlich grober Genauigkeit gemessen werden konnte und kann. So waren die Spielregeln: Die Theorie macht unendlich viele unendlich genaue Aussagen. Dann wird geprüft so gut es geht, und wenn Unstimmigkeiten zutage treten, dann wird die Theorie verbessert. Dieses Ideal der Physik hat die Quantentheorie aufgegeben, und liefert anstelle einer vollständigen Beschreibung des Einzelfalls in den meisten Fällen nur statische Aussagen, die noch dazu nur mit Messgeräten überprüft werden können, deren Funktionsweise ausschließlich durch eine andere Theorie, nämlich die klassische Theorie, beschrieben werden kann.

Es kommt mir vor wie bei einem Kreuzworträtsel. Wenn man einige falsche Einträge gemacht hat, und partout nicht radieren möchte, dann ist man bei den folgenden senkrechten Einträgen zu immer abenteuerlicheren Worterfindungen gezwungen. Nachdem in den Grundlagen der Quantentheorie offenbar einiges verunglückt

ist, versuchen Sie jetzt durch immer kühnere und unglaubwürdigere Hilfsannahmen die Unvollständigkeit und Unzulänglichkeit der Theorie zu verdecken, zum Beispiel durch die Annahme dass beliebig weit ausgedehnte Quantensysteme als untrennbare Einheit zu betrachten sind, oder durch die Behauptung dass es kein Mangel der Quantentheorie sei, wenn sie unfähig ist den makroskopischen Grenzfall von Quantensystemen, sprich Messgeräte, zumindest im Prinzip korrekt zu beschreiben. Und ich sage ganz ohne Ironie: Der Kunstfertigkeit, mit der es Ihnen bis heute immer wieder gelungen ist haarscharf an offenen Widersprüchen vorbeizuschrammen, kann ich den Respekt nicht versagen. Besser wäre es aber doch wohl, nochmal einen Schritt, nein, drei Schritte zurückzutreten, und ein neues, besseres Fundament der Theorie zu erarbeiten.

BOHR: Wenn wir über die richtige Grundlegung der Quantentheorie nachdenken, dann müssen epistemologische Gesichtspunkte eine entscheidende Rolle in unseren Überlegungen spielen. Selbstverständlich muss die Quantentheorie zu den Phänomenen passen, die wir mit ihrer Hilfe beschreiben und verstehen wollen. Sie muss zugleich aber auch zu uns passen. Ihre Begriffe müssen dem menschlichen Erkenntnisvermögen angemessen sein. Sonst wäre die Theorie wie ein Buch, das vielleicht einen korrekten Inhalt hat, den wir aber nicht entziffern und verstehen können, also völlig nutzlos.

SCHRÖDINGER: Es ist ja in der Geschichte der Naturforschung oftmals vorgekommen, dass Begriffe erweitert, oder neu interpretiert, oder ganz aus der Beschreibung eliminiert werden mussten, wenn das Forschungsgebiet wesentlich erweitert wurde und dabei Tatsachen ins Blickfeld gerieten, für die die altbekannten Begriffe einfach ungeeignet oder sogar falsch waren. Als vor mehr als zwei Jahrtausenden die Kugelgestalt der Erde entdeckt wurde, da wurden scheinbar einfache Begriffe wie „oben“ und „unten“ auf einmal mehrdeutig. Ein neueres Beispiel ist die Relativitätstheorie. Als klar

wurde, dass es mit der Geschwindigkeit des Lichts im Vakuum eine universell gültige Obergrenze für die Geschwindigkeit gibt, mit der Signale übertragen werden können, da erkannte Einstein, dass eine widerspruchsfreie Beschreibung der experimentellen Tatsachen nur möglich ist, wenn man solche altbewährten Begriffe wie „gleichzeitig“, „vorher“, „nachher“ nicht mehr so unbefangen und leichtfertig verwendet wie das bis dahin üblich war. In so einer Situation könnte man versuchen, die missverständlichen alten Begriffe durch bessere zu ersetzen. Man könnte etwa statt „unten“ etwas umständlich sagen „zum Gravitationszentrum hin“, und statt „oben“ „vom Gravitationszentrum weg“. Aber in der Praxis verwenden wir doch meist die alten Begriffe weiter, nur vorsichtiger. Die Vorsicht besteht darin, dass wir im Hinterkopf behalten dass Begriffe wie „gleichzeitig“, „vorher“, „unten“ nur in einem begrenzten Anwendungsbereich unmissverständlich verwendet werden können. Sobald wir uns den Grenzen des Anwendungsbereichs nähern, müssen wir zu einer sorgfältiger formulierenden Sprechweise wechseln.

BOHR: Die wesentliche Einsicht besteht nun darin, dass diese gewohnten Methoden der Begriffs-Erweiterung und -Präzisierung angesichts der Quantenphänomene versagen, und die Analogie mit der Relativitätstheorie in dieser Hinsicht nicht zutrifft. Man könnte ja die gesamte nichtrelativistische klassische Physik mit den Begriffen und dem mathematischen Apparat der relativistischen Physik formulieren. Das wäre zwar in vielen Fällen unnötig umständlich, aber grundsätzlich problemlos möglich. Die nichtrelativistische Physik würde damit bedeutungslos und könnte vollständig gestrichen werden. Dagegen können wir die klassische Physik in keiner Weise durch die Quantentheorie ersetzen. Im Gegenteil. Die klassische Physik ist der Ast, auf dem wir sitzen. Wenn wir den absägen, dann ist überhaupt keine Physik mehr möglich, auch keine Quantenphysik. Die klassischen Begriffe sind und bleiben die einzigen,

über die wir verfügen. Wir haben keine Quantenbegriffe, die die klassischen Begriffe ergänzen oder ersetzen könnten. Das nach wie vor beste Beispiel ist die Ein-Teilchen-Interferenz. Wir können alle Begriffe unseres Wortschatzes drehen und biegen wie wir wollen, es gelingt uns einfach nicht, dies verblüffende Phänomen in Worte zu fassen. Zumindest nicht in ein Wort. Wohl aber in zwei, zueinander komplementäre Begriffe der klassischen Physik wie Welle und Teilchen. Wir benötigen beide Begriffe, um das Phänomen der Ein-Teilchen-Interferenz in Worte zu fassen, und zugleich erinnert uns jeder der beiden Begriffe daran, dass der jeweils andere nur unvollständig zutrifft. In ihrer Kombination zur Beschreibung des Quantenphänomens stehen diese beiden Bilder nicht etwa im Widerspruch zu einander, sondern ermöglichen in ihrer komplementären Ergänzung die angemessene und erforderliche Erweiterung des klassischen Begriffsrahmens.

## 6. Verstehen

SCHRÖDINGER: Ist denn mit dieser „komplementären“ Verwendung von Begriffen, die sich nach klassischem Verständnis wechselseitig ausschließen, ein wirkliches Verständnis erreicht, oder handelt es sich bei der Quantentheorie lediglich um einen glücklich erratenen mathematischen Formalismus? Nehmen Sie für sich in Anspruch, dass Sie die verblüffende Ein-Teilchen-Interferenz wirklich verstehen?

BOHR: Was muss das Wort verstehen<sup>40</sup> in diesem Zusammenhang

---

<sup>40</sup> “I think I can safely say that nobody understands quantum mechanics.” Diesen berühmten Satz sprach der erfolgreiche Quantentheoretiker Richard Feynman, drei Jahrzehnte nach dem in diesem Dokument berichteten Gespräch, in einem im November 1964 gehaltenen Vortrag (R. Feynman: *The Character of Physical Law*, MIT Press, Cambridge MA, USA, 1967, 6<sup>th</sup> lesson, page 129). Dagegen beteuerten Bohr und Heisenberg seit dem Sommer 1927,

denn vernünftigerweise bedeuten? Wenn wir sagen dass wir etwas verstanden haben, dann meinen wir dass es uns gelungen ist, eine Brücke zu errichten zwischen dem objektiven Sachverhalt und unserem menschlichen Erkenntnisvermögen. Die Theorie ist der formale Ausdruck unserer Erkenntnis. Die Theorie spiegelt einerseits den objektiven Sachverhalt wieder, andererseits die Eigenart menschlichen Denkens. Unser menschliches Denkvermögen wiederum ist nicht unvermittelt vom Himmel gefallen, sondern es hat sich in den vielen Millionen Jahren unserer Evolution entwickelt. Und es hat sich während dieser Zeit in der Auseinandersetzung mit unserer Umwelt bewährt, sonst wären wir heute nicht hier. Deshalb dürfen wir darauf vertrauen, dass unsere Art zu denken, unser Erkenntnisvermögen, und die Begriffe die wir in dieser langen Zeit entwickelt haben, zumindest diejenigen Phänomene unserer alltäglichen Umgebung gut repräsentieren, die während der Evolution wichtig waren. Die Begriffe der klassischen Physik sind die verfeinerte und präzisierte Form unserer Alltagsbegriffe, aber es sind nicht völlig andere. Nur diese passen in unser Gehirn, wir haben keine anderen, wir werden keine anderen bekommen, und wir müssen

---

die Quantentheorie vollkommen verstanden zu haben. Heisenberg nannte die von beiden Physikern gemeinsam erarbeitete Interpretation *Die Kopenhagener Deutung der Quantentheorie*, und stellte sie in zahlreichen Vorträgen vor, unter denen insbesondere die Gifford Lectures [6] hervorzuheben sind. In seiner Autobiographie [7, 3. Kapitel] erinnert Heisenberg sich an das erste Gespräch, das er 1922 mit Bohr über die Atomphysik führte. Heisenberg fragte, ob man die Atome jemals verstehen werde, wenn Menschen doch anscheinend über keine Sprache verfügen, in der man über diese Strukturen angemessen reden könne. Bohr habe geantwortet: „Doch. Aber wir werden dabei gleichzeitig erst lernen, was da Wort ‚verstehen‘ bedeutet.“ Wenn Bohr seine folgenden Sätze im Gespräch mit Schrödinger mit der Frage nach der Bedeutung des Wortes ‚verstehen‘ einleitet, dann ist das also sicherlich keine beiläufige rhetorische Floskel, sondern lässt vielmehr erkennen dass er jetzt auf einen zentralen Punkt der Kopenhagener Interpretation der Quantentheorie zusteuert.

zusehen, wie wir aus unseren Denk- und Erkenntnismöglichkeiten das Beste machen.

Unsere Aufgabe als Naturforscher besteht darin, die Phänomene zu erforschen, und ihre Zusammenhänge zu verstehen. Zu Phänomenen<sup>41</sup> werden Quantenobjekte immer nur im Zusammenspiel mit Messgeräten, die wir mit den Methoden der klassischen Physik beschreiben können und müssen. Gegebenenfalls kann es sich beim klassischen Messgerät auch um ein vordergründig so einfaches Gerät wie das menschliche Auge handeln. Das gesamte Arrangement der Randbedingungen, wie Spiegel, Spalte, photographische Platten und so weiter, gehört untrennbar zum Quantenphänomen, genauso wie die Atome, Photonen und anderen Quantenobjekte, die sich in diesem Arrangement bewegen, und deren Existenz nur – ich betone nur! – mithilfe dieses Arrangements zu unserer Kenntnis gelangt. Niemals hat ein Physiker es mit einem isolierten Quantenobjekt zu tun, immer und ausnahmslos sind Quantenobjekte in einen klassisch beschreibbaren Rahmen eingebettet, und werden nur dadurch zu Quantenphänomenen. Ohne diesen Rahmen wären sie eben keine Phänomene, und die Physik hätte keinen Anlass sich mit einem Quantenobjekt zu befassen, das nur phantasiert aber nicht beobachtet wird. Wenn ein Elektron mit einer Interferenzapparatur beobachtet wird, dann darf ich es mir als Welle vorstellen. Wenn es mit einem Teilchendetektor beobachtet wird, dann darf ich es mir als Teilchen vorstellen. Ein rätselhaftes Mysterium kann nur auftreten, wenn ich mir die klassische Apparatur wegdenke und über das Wesen eines Elektrons philosophiere und wissen möchte, was denn das Elektron „an sich“ ist. Das wäre aber eine unphysikalische Frage, denn ein Elektron, das nicht in eine klassische Apparatur eingebettet ist, kann kein Objekt physika-

---

<sup>41</sup> Das griechische Wort „Phänomen“ bedeutet das „Erscheinende“ oder das „Sichtbare“.

lischer Beobachtung sein. Nur ein isoliertes Quantenobjekt ohne klassischen Rahmen müsste uns wohl unverstündlich erscheinen. Aber alle beobachteten Quantenphänomene können wir eben wegen ihrer Beobachtbarkeit und im klassischen Rahmen, der ihre Beobachtbarkeit bewirkt, auch verstehen.

Wir müssen grundsätzlich und immer den experimentellen Aufbau, die Apparate und Messgeräte mit denen wir arbeiten, als einen integralen Bestandteil des Quantenphänomens betrachten. Solange wir Fragen stellen wie „ist ein Elektron eine Welle oder ein Teilchen?“ oder „wird ein Photon an einem Strahlteiler aufgespalten, oder entscheidet es sich für die eine oder die andere Richtung?“, ohne auf den gesamten experimentellen Aufbau Bezug zu nehmen und ihn in die Beschreibung einzubeziehen, solange werden wir nicht aus dem Sumpf von verwirrenden Widersprüchen herauskommen. Sobald wir aber anerkennen, dass wir nur über Quantenphänomene als Ganzes sinnvoll sprechen können, lösen sich schlagartig alle scheinbaren Paradoxa, die uns zuvor so viel Kopfzerbrechen bereiteten.

SCHRÖDINGER: Sie haben eben zum wiederholten male gesagt, dass ein Quantenphänomen nur aufgrund seines klassischen Rahmens beobachtbar sei, und dass ein Quantensystem ohne einen derartigen Rahmen – weil nicht beobachtbar – kein zulässiges Objekt physikalischer Überlegungen sei. Diese Betonung der Beobachtbarkeit bringt Sie in die Nähe einer positivistischen Philosophie, die nach meiner Vermutung eigentlich gar nicht Ihren Überzeugungen entspricht.

BOHR: Man könnte vielleicht formulieren, dass eine positivistische Physik die Sinneseindrücke der Beobachter als grundlegende Elemente des Geschehens betrachten würde, während die Quantentheorie<sup>42</sup> als grundlegende Elemente die faktischen, in klassischer

---

<sup>42</sup> Hier setzt Bohr mit vielleicht doch etwas übertriebener Selbstgewissheit die

Sprache beschreibbaren objektiven Ereignisse betrachtet. Wie alle unsere physikalischen Theorien geht auch die Quantentheorie in ihren Konzepten und Annahmen weit über das hinaus, was unmittelbarer Beobachtung und experimenteller Überprüfung zugänglich ist. Und ich bin nicht der Meinung, dass eine physikalische Theorie auf einen langweiligen positivistischen Katalog von Beobachtungsdaten reduziert werden sollte. Die Beschränkung, die wir uns in der Naturwissenschaft tatsächlich klugerweise auferlegen sollten ist von völlig anderer Art: Wir sollten das und nur das als Physik betrachten, worüber man sprechen kann. Sinnvoll sprechen kann ein Mensch nicht über isoliert gedachte Atome, Elektronen und Photonen. Sinnvoll sprechen können wir nur über Quantenphänomene als ganzes. Der klassisch beschriebene Rahmen, in den die Atome, Elektronen und Photonen eingebettet sind, ist ein integraler, nicht abtrennbarer Bestandteil jedes Quantenphänomens, in der Sprache des Aristoteles die „Form“ des Phänomens.<sup>43</sup>

Das ist eine glückliche Koinzidenz: Alles, was wir beobachten können, das können wir auch verstehen. Und alles, was wir verstehen können, das können wir auch beobachten. In beiden Richtungen ist es der klassische Rahmen der Quantenphänomene, sprich die klassisch beschriebenen Messgeräte, welche die Beobachtbarkeit und die Verstehbarkeit der Quantenphänomene bewirken.

Ein Phänomen ohne Form ist ein genauso undenkbares Uding wie eine Medaille mit nur einer Seite. So etwas passt nicht in ein menschliches Gehirn, und es ist auch kein vernünftiges Ziel, nach der Erkenntnis einer einseitigen Medaille oder einem Verständnis

---

Kopenhagener Interpretation der Quantentheorie mit „der Quantentheorie“ gleich.

<sup>43</sup> Einen Essay über den Einfluss der Philosophie des Aristoteles auf die Kopenhagener Deutung der Quantentheorie findet man hier:

*Möglichkeit und Form*, APIN Mitteilung sd00211 (2011)

<http://www.astrophys-neunhof.de/mtlg/sd00211.pdf>

von Atome, Elektronen, oder Photonen ohne klassischen Rahmen zu streben.

SCHRÖDINGER: Leukipp und Demokrit<sup>44</sup> lehrten bekanntlich, dass letztlich nur die Atome und die Leere als real gelten können, und alle Dinge und deren Eigenschaften nur sekundär aus Zusammensetzungen von Atomen und der Leere entstehen. In Ihrem Weltbild sind dagegen offenbar die „unteilbaren Quantenphänomene“ die elementare Einheit, und die isoliert gedachten Atome, Elektronen, oder Photonen nur sekundäre, indirekt aus den unteilbaren Quantenphänomenen erschlossene Objekte, deren ontologischer Status – behutsam gesagt – zweifelhaft erscheint, falls Sie ihnen nicht sogar jegliche Realität absprechen wollen.

BOHR: Die Frage nach dem ontologischen Status von Quantenobjekten ohne klassische Rahmen, scheint mir, führt uns auf ein falsches Gleis. Unsere Aufgabe als Physiker ist es nicht, herauszufinden was das Wesen oder der ontologische Status von irgend etwas ist<sup>45</sup>, sondern die Zusammenhänge und die Ordnung der mannigfachen Erfahrungen zu klären, die wir in der Auseinandersetzung mit der Natur machen. Die individuellen Quantenphänomene sind tatsächlich die kleinsten Einheiten, mit denen wir uns sinnvoll befassen können, und jede weitere gedankliche Aufspaltung unserer Forschungsobjekte führt nicht zu weiterer Einsicht, sondern nur zu nutzloser Verwirrung.

SCHRÖDINGER: Sie geben sich mit einem Verständnis der Quantenphänomene zufrieden, das die Form miteinander unvereinbarer klassischer Bilder hat, die Sie als komplementär bezeichnen. Die Einbeziehung der miteinander unverträglichen oder komplementären klassischen Messgeräte in die Quantenphänomene läuft nach

---

<sup>44</sup> Leukipp und Demokrit, die gegen 400 BCE in der Stadt Abdera in Thrakien lebten, gelten als Erfinder der altgriechischen Atomlehre.

<sup>45</sup> siehe Fußnote 33 auf Seite 36

meinem Eindruck darauf hinaus, dass Sie nicht die Quanten selbst beschreiben, sondern vielmehr eine Methode zur Beschreibung von Quanten definieren. Sollten wir nicht doch versuchen zu einheitlichen statt nur komplementären Vorstellungen zu kommen, das heißt zu einer Beschreibung der Quanten selbst, statt nur zu einer Methode der Beschreibung in Form komplementärer Arrangements klassischer Messgeräte?

BOHR: Es besteht ein Spannungsverhältnis zwischen der Welt, wie sie nun einmal ist, und unserem Denk- und Erkenntnisvermögen, wie wir es nun einmal haben. Die komplementäre Sichtweise, die Betrachtung eines Sachverhalts aus komplementären Blickwinkeln, scheint mir die beste, sogar die einzig mögliche Methode zu sein, um den Sachverhalt richtig und vollständig unserer Erkenntnis zu erschließen. Das gilt nicht nur für Quantenphänomene, sondern weit über die Physik hinaus. Denken Sie an ein Phänomen wie das Leben. Wir können die Zusammensetzung eines Lebewesens aus Atomen und Molekülen im Prinzip beliebig genau analysieren. Aber diese Analyse wird zwangsläufig unvollständig sein, und einen wesentlichen Teil dessen, was „Leben“ ausmacht, nicht enthalten. Wir müssen uns zusätzlich auf einen anderen Standpunkt stellen und beobachten, wie das Leben eines Käfers abläuft der über ein Blatt krabbelt und Nahrung sucht, um einen vollständigen Eindruck des Phänomens „Leben“ zu erhalten. Diese zwei Arten der Betrachtung können offensichtlich nicht gleichzeitig stattfinden, sondern sind komplementär zueinander. Oder überlegen Sie, wie wir das Verhalten eines Kindes beurteilen, dessen Erziehung uns anvertraut ist. Nur wenn wir es aus den komplementären Blickwinkeln von Gerechtigkeit und Liebe betrachten, können wir unserer Verantwortung gerecht werden.

SCHRÖDINGER: Sie nennen Beispiele für Ihren Begriff der Komplementarität, aber Sie versuchen nicht, diesen Begriff zu definieren.

Vielleicht tun Sie gut daran. Jede Begriffsdefinition muss ja auf wieder anderen Begriffen beruhen, die ebenfalls wieder definiert werden müssten. In der Theorie endet die Definition von Begriffen in einem infiniten Regress, in der Praxis damit, dass eine sehr große Zahl von Basisbegriffen undefiniert stehenbleibt.

BOHR: Tatsächlich lernen wir diejenigen Begriffe, die Sie als undefinierte Basisbegriffe bezeichnen, durch das Zeigen auf Beispiele kennen. Und ich habe in den vergangenen Jahren immer wieder versucht, auch den Begriff der Komplementarität durch den Hinweis auf Beispiele zu verdeutlichen. Aber damit ist die Begriffsdefinition ja noch nicht vollendet. In einem zweiten Schritt ist eine Verallgemeinerung vom gezeigten Beispiel auf den mehr oder weniger abstrakten und komplexen Sachverhalt erforderlich, der durch den Begriff bezeichnet werden soll. Diese Verallgemeinerung muss jeder Mensch für sich vollziehen, und es ist höchst erstaunlich und bemerkenswert, dass wir sie so vollziehen, dass in den meisten Fällen eine recht genaue Verständigung zwischen den Menschen möglich ist.

SCHRÖDINGER: Diese Tatsache lässt die Vermutung plausibel erscheinen, dass nicht jeder Mensch in seinem privaten Bewusstsein seine eigenen Begriffe entwickelt, sondern dass wir alle Anteil haben an einem umfassenden, universellen Weltbewusstsein.<sup>46</sup>

---

<sup>46</sup> Hier klingt Schrödingers Weltanschauung an, die er in seinen schriftlichen Arbeiten zur Physik stets sorgfältig ausgeblendet hat. Schrödinger war tief beeindruckt von den indischen Upanishaden, deren Lehre er sich – mit ausdrücklicher Ausnahme der Lehre von der Wiedergeburt – in weiten Teilen zu Eigen gemacht hat. Eine kurze Darstellung seiner philosophischen Ansichten findet man in  
E. Schrödinger: *Mein Leben, Meine Weltansicht*, (Paul Zsolnay, Wien, 1985).

## 7. Der Schnitt

Bohr klopft an einem Baumstamm seine längst erkaltete Pfeife aus, und stopft sie neu.

SCHRÖDINGER: Die Philosophen sind von jeher der Überzeugung dass Erkenntnis nur möglich sei, wenn die Welt unterteilt wird in erkennendes Subjekt und erkanntes Objekt. Wenn diese Unterteilung tatsächlich erforderlich ist – und ich meine schon, dass es so ist –, dann tritt hier die Unzulänglichkeit der derzeitigen Quantentheorie abermals deutlich zutage. Denn zufolge dieser Theorie werden die Zustände von Objekt und Subjekt miteinander verschränkt, wie von Neumann gezeigt hat<sup>47</sup>, und der verschränkte Beobachter ist klarerweise zu keiner Erkenntnis fähig. Formal gesagt: Statt des verschränkten reinen Zustands des Gesamtsystems würden wir ein Gemisch benötigen, das ein Produkt der Zustandsfunktionen von Objekt und Subjekt ist.

BOHR: Sie haben in beiden Punkten vollständig recht. Erstens ist die Trennung zwischen Subjekt und Objekt wirklich eine unverzichtbare Voraussetzung jeglicher Erkenntnis. Zweitens ist diese Trennung unmöglich, wenn man nicht nur das Objekt sondern auch das Subjekt mit den Methoden der Quantentheorie beschreibt. Man erreicht die erforderliche Unterteilung aber, wenn man nur dem Quantenobjekt eine quantentheoretische Zustandsfunktion zuordnet, den Beobachter und die von ihm verwendeten Messgeräte aber klassisch beschreibt. Ich weiß dass Ihnen diese Vorgehensweise nicht gefällt, Sie hätten lieber für Objekt und Subjekt eine einheitliche Theorie aus einem Guss. Aber immerhin werden Sie doch zugeben, dass die epistemologisch erforderliche Trennung von erkanntem Objekt und erkennendem Subjekt durch die Kombination von Quantentheorie und klassischer Theorie erreicht wird.

---

<sup>47</sup> siehe Fußnote 15 auf Seite 19

Dabei müssen wir – um präzise zu sein – bemerken, dass die Grenze zwischen Objekt und Subjekt nicht identisch ist mit der Trennungslinie zwischen dem Bereich, der durch die Quantentheorie beschrieben wird, und den klassisch beschriebenen Messgeräten. Letztere Trennungslinie wurde manchmal auch als „Schnitt“ bezeichnet. Ein durchaus passendes Wort, um den diskontinuierlichen Charakter des Übergangs zwischen beiden Arten der Darstellung zu betonen. Der Schnitt verläuft vollständig innerhalb des „erkannten Objekts“, sprich innerhalb des beobachteten Quantenphänomens. Denn auch die klassisch beschriebenen Messgeräte sind ein integraler Bestandteil des Quantenphänomens.

SCHRÖDINGER: Letztlich kommt ja immer das gleiche Ergebnis raus, egal an welcher Stelle in einer Kette von Messgeräten, die sich zwischen dem Quantenobjekt und dem Beobachter befinden, man den Übergang von der quantenmechanischen Beschreibung zur klassischen Beschreibung durchführt. Das ist wieder ein wesentlicher Unterschied gegenüber dem Verhältnis zwischen relativistischer und nicht-relativistischer Physik. Die relativistische Beschreibung liefert immer ein anderes Ergebnis als die nicht-relativistische, wenn auch der Unterschied in vielen Fällen unmessbar klein ist. Die quantenmechanische Beschreibung ist zwar offensichtlich vollkommen andersartig, und zugleich doch letztlich numerisch äquivalent zur klassischen Beschreibung.

BOHR: Das gilt nur für solche Objekte wie Geigerzähler und Katzen, die beide Arten der Beschreibung erlauben. Bei einem Atom ist ausschließlich die quantenmechanische Beschreibung möglich, und von Äquivalenz mit einer anderen Beschreibung kann keine Rede sein. Wir sollten auch nicht vergessen, dass eine quantenmechanische Beschreibung von makroskopischen Objekten nur „im Prinzip“ möglich ist. Tatsächlich scheitert dies Vorhaben nicht nur an der Komplexität der Aufgabe, eine gigantische Menge gekop-

pelter Differentialgleichungen zu lösen, sondern vor allem an der Unmöglichkeit, den Anfangszustand des Systems mit atomarer Auflösung zu messen und in die Berechnung einzusetzen.

Zwar habe ich Ihnen mehrfach zugestanden, dass der Schnitt verschieblich ist, und an beliebiger Stelle zwischen dem eigentlichen Quantenobjekt und dem Beobachter angeordnet werden kann. Dennoch wäre es wohl besser, wenn wir uns auch bei prinzipiellen Überlegungen an die pragmatische Regel halten würden, die Physiker bei ihrer täglichen Arbeit ohnehin ausnahmslos anwenden, nämlich alles was klassisch beschrieben werden kann – wie beispielsweise Geigerzähler und Katzen – auch klassisch zu beschreiben.

Diese Regel bietet nämlich den wichtigen Vorteil, dass wir nicht so leicht die Tatsache aus den Augen verlieren dass wir bei der Untersuchung von Quantenphänomenen niemals die Natur „ansich“ beobachten und beschreiben, sondern die Natur die unserer jeweiligen Fragestellung ausgesetzt ist. Die von uns in willkürlicher Weise arrangierten Messgeräte prägen die Erscheinungsform des Quantenphänomens. Das sehen wir deutlicher, wenn wir sämtliche Messgeräte, die eine klassische Beschreibung erlauben, auch tatsächlich klassisch beschreiben.

SCHRÖDINGER: Selbst wenn man auf die Verschieblichkeit des Schnitts verzichtet, und ihn gemäß Ihres Vorschlags stets so dicht wie möglich am eigentlichen Quantenobjekt anordnet, bleibt seine Natur doch rätselhaft. Wenn man z. B. hinter einem optischen Strahlteiler den Ort eines einzelnen Photons misst, dann gibt es zufolge der Quantentheorie ein Zufallsergebnis, das jeder rationalen Erklärung entzogen ist. Sicher ist nur, dass man das ungeteilte Photon entweder auf dem einen Weg findet, und auf dem anderen Weg keines, oder dass man das ungeteilte Photon auf dem anderen Weg findet, und auf dem einen Weg keines. Das ist umso irritie-

render, als im rein klassischen Bereich die Gesetze der klassischen Physik eine kontinuierliche und deterministische Zustandsänderung beschreiben, und auch im reinen Quantenbereich die Differentialgleichung der  $\psi$ -Funktion eine kontinuierliche und deterministische Zustandsänderung beschreibt. Nur am Schnitt fügen die beiden Bereiche sich in nicht berechenbarer Weise zusammen, und es gibt Messergebnisse, die – so zumindest Ihre Interpretation der Quantentheorie – nicht deterministisch bestimmt sind.

BOHR: Nur in manchen Fällen kann ein Messergebnis sicher vorhergesagt werden. Im Allgemeinen können wir lediglich die Wahrscheinlichkeiten verschiedener Messergebnisse berechnen. Sie wissen, dass diese Vorhersagen der Quantentheorie durch alle experimentellen Prüfungen bestätigt werden. Das erklärt nicht, warum die Natur so eigenartig beschaffen ist, sondern es bestätigt lediglich, dass die Natur nun einmal so ist wie von der Quantentheorie beschrieben. Dass aus der spatiokausalen Inkompatibilität<sup>48</sup> die Abschaffung des Determinismus folgt, kann man durchaus als eine der erfreulichsten Erkenntnisse der Quantentheorie betrachten. Ich zumindest möchte nicht in einer Welt leben, in der jedes Ereignis, und selbst jeder Gedanke jedes Menschen, schon von jeher unabänderlich vorherbestimmt ist.

SCHRÖDINGER: Entschuldigen Sie, wenn ich Sie zum wiederholten male darauf hinweise: Die Übereinstimmung zwischen der derzeit existierenden Quantentheorie und diesem oder jenem Experiment

---

<sup>48</sup> Da Schrödinger leider nicht gegen das Wortungetüm „spatiokausale Inkompatibilität“ einschreitet, muss der Herausgeber tätig werden: (lateinisch) spatio-temporal bedeutet raum-zeitlich. Bohr pflegt eine Beschreibung, in der Ort und Zeit wohldefiniert sind, als „spatio-temporal koordinierte Beschreibung“ zu bezeichnen. Eine Beschreibung mit wohldefinierten Energie- und Impulswerten nennt er „kausale Beschreibung“. „Spatiokausale Inkompatibilität“ bedeutet, dass man in der Quantentheorie nicht beides gleichzeitig haben kann.

beweist erstens nicht, dass diese Theorie richtig ist, sondern sie beweist lediglich, dass diese Theorie in dieser oder jener Hinsicht nicht falsch ist. Und die Übereinstimmung beweist zweitens und vor allem nicht die Unmöglichkeit einer besseren Theorie, die nicht nur dieses oder jenes Experiment genau so gut erklärt, sondern vielleicht darüber hinaus bedeutende zusätzliche Erkenntnisse mit sich bringt.

Hinsichtlich der Abschaffung des Determinismus sind meine Gefühle zwiespältig. Einerseits möchte ich auch gerne glauben, dass mein Denken und Handeln etwas anderes ist als der Ablauf eines vorherbestimmten Uhrwerks. Andererseits war das Vertrauen darauf, dass es für alle Ereignisse in dieser Welt eine rationale und zumindest prinzipiell nachprüfbare kausale physikalische Erklärung gebe, die vielleicht wichtigste Motivation einer über drei Jahrhunderte andauernden erfolgreichen Entwicklung der neuzeitlichen Wissenschaft. Es fällt mir nicht leicht, diese Überzeugung angesichts der Quantenphänomene nun auf einmal über Bord zu werfen.

BOHR: Das fällt niemandem leicht, mir auch nicht. Aber mir scheint, dass die Untersuchung der Quantenphänomene uns keine andere Wahl lässt.

## 8. Messung und Musik

SCHRÖDINGER: Die eigenartigen Zufallsergebnisse bei der Messung treten ja deshalb auf, weil die endliche Größe des Planck'schen Wirkungsquantums verhindert dass wir Messungen so feinfühlig und behutsam durchführen können, wie wir das nach dem klassischen Ideal eigentlich tun sollten. Damit das Gerät überhaupt irgend etwas misst, muss es mit dem Quantenobjekt mindestens eine Wirkung von der Größenordnung des Wirkungsquantums austau-

schen, und bei der genauen Messung einer Variablen wird die dazu kanonisch konjugierte Variable dementsprechend unkontrolliert gestört.

BOHR: Man sollte nicht sagen, dass die Phänomene durch die Messung „gestört“ werden. Denn die Messung ist ja ein integraler und unverzichtbarer Bestandteil jedes Phänomens. So sagen wir doch auch nicht, dass die Musiker eines Streichquartetts die Musik dadurch stören, dass sie mit den Bögen die Saiten zu Schwingungen anregen. Und wenn sie die Bögen beiseite legen und beim Pizzicato die Saiten mit den Fingern zupfen, dann klingt die Musik auf einmal ganz anders. Werden wir deswegen fragen, wie denn wohl die „wahre“ oder „eigentliche“ Musik „an sich“ klänge, wenn sie weder durch Geigenbögen noch durch Zupfen mit den Fingern verfälscht würde? Natürlich nicht, weil wir ja wissen dass die Musik durch das Zusammenwirken von Musikinstrumenten und Bögen und Fingern der Musiker überhaupt erst entsteht, und dass es ganz sinnlos wäre von Musik ohne diese Voraussetzungen zu sprechen.

SCHRÖDINGER: Welche Rolle spielen in dieser Analogie die Zuhörer? Wenn sie sich die Ohren zuhalten und nichts mehr hören, existiert dann die Musik nicht mehr?

BOHR: Die Zuhörer entsprechen der Vorstellung, die sich die Klassische Physik von Messinstrumenten macht. Sie registrieren alles genau, ohne merklich auf das gemessene Objekt zurückzuwirken. Wenn aber die Musik ein taugliches Analogon für Quantenphänomene sein soll, dann müssen wir die Musiker, und nicht die Zuhörer, als „Messinstrumente“ bezeichnen. Denn aufgrund der endlichen Größe des Planckschen Wirkungsquantums üben die Messinstrumente eine deutliche und nicht vernachlässigbare Wirkung aus, die das Erscheinungsbild des Quantenphänomens prägt, so wie die Musiker die Erscheinungsweise der Musik prägen.

SCHRÖDINGER: Es ist nicht immer das Wirkungsquantum verant-

wortlich, wenn ein Phänomen erst durch Beobachtung erzeugt und durch Art und Umstände der Beobachtung geprägt wird. Denken Sie nur an den Regenbogen. Der objektive Tatbestand ist, dass Sonnenlicht in einen Regenschauer eingestrahlt wird, an jedem einzelnen Tropfen – je nach Einfallswinkel – gebrochen, in seine verschiedenen Farben zerlegt, und teilweise reflektiert wird. Sämtliche Farben werden mehr oder weniger gleichmäßig in sämtliche Richtungen gestreut. Ein „Bogen“ kommt in einer objektiven, vollständigen Beschreibung des Sachverhalts überhaupt nicht vor.

Ein Bogen entsteht erst dadurch, dass ein Beobachter von seinem Standpunkt aus selektiv nur einen winzigen Teil des Streulichts wahrnimmt. Und vom Standpunkt des Beobachters hängt es auch ab, an welchen Punkten der Erdoberfläche sich die Fußpunkte des Regenbogens befinden. Ein anderer Beobachter, der ein paar hundert Meter entfernt ist, sieht auch einen Regenbogen, aber man kann eigentlich nicht sagen, dass es sich um den gleichen Regenbogen handelt, und auf jeden Fall sehen die beiden Beobachter die Fußpunkte ihrer jeweiligen Bögen an unterschiedlichen Stellen der Erdoberfläche. Wenn kein Beobachter da ist und hinschaut, dann können Sonne und Regentropfen sich anstrengen soviel sie wollen, sie bringen keinen Regenbogen zustande.

BOHR: Das ist ein sehr schönes Beispiel für ein klassisches Phänomen, das durch den Beobachter erzeugt und geprägt wird. Der Regenbogen ist deshalb ein klassisches Phänomen, weil man bis ins letzte Detail analysieren kann, was der objektive, von der Beobachtung unabhängige Sachverhalt ist – nämlich die Brechung des Sonnenlichts, und seine mehr oder weniger gleichmäßige Streuung in alle Richtungen – , und welche Eigenschaften durch die Beobachtung erzeugt werden – nämlich die Form eines Bogens, und die Position seiner Fußpunkte. Es ist charakteristisch für Quantenphänomene, dass bei ihnen eine klare Unterscheidung zwischen

objektivem Sachverhalt und Einwirkung des Beobachters niemals möglich ist. Genau deshalb enthält die Zustandsfunktion stets eine untrennbare Mischung von beidem. Ich stimme Ihnen zu, dass diese Vermischung die Interpretation der Zustandsfunktion schwierig macht. Aber dabei handelt es sich um eine Schwierigkeit, die sich aus der Natur der Sache ergibt und absolut unvermeidlich ist.

Nachdem sie auf einem hölzernen Steg den Bach überquert und eine Weide umrundet haben, auf der einige Kühe grasen, folgen die beiden Männer jetzt einem Feldweg, der sie in weitem Bogen wieder zur Universität zurückführt.

## 9. (K)eine einheitliche Theorie?

SCHRÖDINGER: Mit Hinblick auf die von Einstein, Podolski und Rosen ins Gespräch gebrachte Methode indirekter Messungen an verschränkten Quantensystemen würde ich sagen, dass noch nicht das letzte Wort darüber gesprochen ist, in wieweit wir wirklich die Einschränkungen der objektiven Beschreibbarkeit von Quantensystemen hinnehmen müssen, die sich vordergründig aus Heisenbergs Unbestimmtheitsrelationen zu ergeben scheinen.

Sie wollen aber darüber hinaus noch eine weitere Abkehr von den Idealen der klassischen Physik etablieren, indem Sie auf eine einheitliche Theorie verzichten, und stattdessen zwei unterschiedliche Dynamiken parallel zueinander verwenden. Nämlich eine Dynamik, in der sich der Quantenzustand, beschrieben durch die Wellenfunktion, stetig und deterministisch im Lauf der Zeit entwickelt. Und eine zweite Dynamik, in der klassisch beschriebenen Messgeräte ins Geschehen eingreifen und eine abrupte, unstetige Änderung bewirken. Als vorläufige Notmaßnahme, solange wir die Zusammenhänge noch nicht vollständig verstehen, könnte man diese Inkonsistenz – widerwillig genug – gerade noch akzeptieren.

Aber damit können wir uns doch nicht dauerhaft zufrieden geben! Wir dürfen uns nicht darüber hinwegtäuschen, dass die Annahme einer klassischen Welt, aus der heraus man „von außen“ Quantenobjekte betrachten kann, eine ad-hoc Annahme ohne jedes physikalische Fundament ist. Sie können ja weder erklären, warum ein Teil der Welt, obwohl er aus Atomen besteht, klassisch beschrieben werden darf, noch können Sie die Grenze zwischen dem Quantenbereich und dem klassischen Bereich präzise angeben, noch können Sie Born's rätselhafte Wahrscheinlichkeitsregel, die den Übergang zwischen beiden Bereichen vermittelt, plausibel begründen.

BOHR: Lassen Sie mich versuchen, Ihre Einwände der Reihe nach zu beantworten.

Erstens: „Warum darf ein Teil der Welt, obwohl er aus Atomen besteht, klassisch beschrieben werden?“ Bevor wir die Frage nach dem „warum“ klären, sollten wir zunächst einmal feststellen dass es sich wirklich so verhält. Millionen von Jahren unserer Evolution haben diese Tatsache einer strengeren Prüfung unterzogen, als es fleißige Experimentatoren in Jahrhunderten leisten könnten. Es kann doch nicht im Ernst daran gezweifelt werden, dass weite Bereiche der Welt durch die klassische Physik angemessen beschrieben werden. Und warum dürfen und müssen wir die Möglichkeit der klassischen Beschreibung nutzen? Weil Physik nicht irgendwie im leeren Raum schwebt, sondern auf die Erkenntnisfähigkeit von Menschen zugeschnitten sein muss. Nur wenn wir uns selbst, und die Messgeräte die wir verwenden, mit der Sprache der klassischen Physik beschreiben, ist wissenschaftliche Erkenntnis überhaupt möglich.

Zweitens: Wir haben tatsächlich keine präzise Definition der Grenze zwischen dem klassischen Bereich und dem Quantenbereich. Aber wir waren uns doch schon darüber einig, dass sich aus der

Verschieblichkeit des Schnitts keinerlei Widersprüche ergeben. Außerdem können wir doch sehr gut leben mit der pragmatischen Regel „beschreibe alles klassisch, was klassisch beschrieben werden kann, und wechsele dann und nur dann zur quantentheoretischen Beschreibung, wenn die experimentelle Beobachtung eines Phänomens die Unzulänglichkeit seiner klassischen Beschreibung beweist.“<sup>49</sup>

Drittens: „Born’s rätselhafte Regel“ wurde wie jedes andere Naturgesetz durch geniales Raten gefunden. Gerechtfertigt werden Naturgesetze nicht durch „plausible Begründungen“, sondern dadurch dass sie allen experimentellen Prüfungen standhalten.

Und viertens: Ja, wir werden dauerhaft die klassische und die Quantentheorie gemeinsam verwenden müssen. Dabei handelt es sich nicht um eine Inkonsistenz, sondern um ein sinnvolles Zusammenspiel dieser beiden Theorien, durch das der objektive Sachverhalt harmonisch mit dem menschlichen Erkenntnisvermögen zusammengefügt wird.

SCHRÖDINGER: Aber unser Bestreben muss doch darauf gerichtet sein, eine einheitliche Beschreibung aller Phänomene zu erreichen. Das war doch die große Entdeckung Newton’s, dass die Bahnbewegung der Planeten um die Sonne und die Trajektorie des vom Baum fallenden Apfels durch identische Gleichungen beschrieben werden können. Und Maxwell fand seine bekannten Gleichungen, mit denen sich elektrische, magnetische, und optische Erscheinungen auf einen Nenner bringen lassen. Das hehre Ziel unser Bemühungen

---

<sup>49</sup> Mit genau diesem Argument zog Léon Rosenfeld (1904–1974) in Zweifel, dass eine Quantentheorie der Gravitation sinnvoll oder gar notwendig sei. Denn nur im Inneren von Schwarzen Löchern, und in der ersten Sekunde nach dem kosmologischen Urknall, werden (hypothetische) Quantengravitations-Phänomene vermutet, die nicht im Rahmen der semi-klassischen Kombination von Einsteins (klassischer) Allgemeinen Relativitätstheorie und der Quantenfeldtheorie aller nicht-gravitativen Wechselwirkungen erklärt werden können.

L. Rosenfeld: *On Quantization of Fields*, Nucl. Phys. **40**, 353–356 (1963)

muss eine Theorie sein, die sämtliche überhaupt physikalisch fassbaren Phänomene in einem Apparat mathematisch formulierter Naturgesetze konsistent zusammenfasst.

Wir wissen, dass die klassische Physik nicht fähig ist, Quantenphänomene angemessen zu beschreiben. Also muss diese Theorie durch eine bessere ersetzt werden. Aber genau das wollen Sie nicht tun. Sie wollen die klassische Physik nicht nur dauerhaft beibehalten, sondern sogar an den Anfang jeder physikalischen Untersuchung stellen. Damit wird die Spaltung der Physik in – mindestens – zwei Theorien als Dauerzustand etabliert. Sie geben das zentrale Ziel einer einheitlichen Theorie aller Phänomene auf, das die Leitlinie von mehr als drei Jahrhunderten physikalischer Theoriebildung war!

BOHR: Es liegt in der Natur des menschlichen Denkens, dass wir Quantenphänomene nur dann vollständig erfassen können, wenn wir ihren quantenhaften Charakter und ihre klassische Form gleichzeitig ins Auge fassen. Der quantenhafte Kern und die klassische Form des Quantenphänomens sind zueinander komplementär, und deshalb nicht auf eine einheitliche Beschreibung reduzierbar. Sie bedingen sich gegenseitig und treten immer gemeinsam auf, wie zwei Seiten einer Medaille. Deshalb werden Quantenphänomene nur durch das komplementäre Zusammenwirken von Quantentheorie und klassischer Theorie angemessen repräsentiert. Jeder Versuch, die klassischen Begriffe durch Quantenbegriffe zu ersetzen, und auf diese Weise eine einheitliche Theorie zu konstruieren, wäre von vornherein zum Scheitern verurteilt, weil dies den Möglichkeiten und Begrenzungen des menschlichen Erkenntnisvermögens zuwider liefe. Das ist grundlegend anders als beim Verhältnis von Relativitätstheorie zur Newton'schen Theorie. Newton's Theorie ist ein Grenzfall der Relativitätstheorie. Dagegen ist weder die Quantentheorie ein Grenzfall der klassischen Theorie, noch ist die

klassische Theorie ein Grenzfall der Quantentheorie. Vielmehr sind beide Theorien unverzichtbare Werkzeuge für ein vollständiges Verständnis der objektiven Realität.

SCHRÖDINGER: Das Gespräch mit Ihnen wäre wirklich einfacher, wenn Sie sich endlich einmal auf eine konsistente Verwendung des Begriffs der Komplementarität festlegen könnten. Vorhin haben Sie es als komplementär bezeichnet, Elektronen oder Photonen je nach Art des klassischen Rahmens als Welle oder Teilchen zu betrachten. Jetzt sagen Sie auf einmal, dass Quantentheorie und klassische Theorie zueinander komplementär seien.<sup>50</sup>

BOHR: Es handelt sich nicht um inkonsistente Verwendungen dieses Begriffs, sondern um die Anwendung des stets gleichen Prinzips in unterschiedlichen Zusammenhängen. Wenn wir für einen Vorgang oder Sachverhalt eine Erklärung aus einem Guss versuchen, eine Beschreibung die alles auf einen Nenner bringt, dann stellen wir bei gründlicher Überlegung meist fest, dass wir zu einer allzu einseitigen Darstellung gelangt sind, die zu kurz greift und wesentliche Züge der untersuchten Sache vernachlässigt. Eine vollständige Erkenntnis gelingt bei vielen Fragestellungen nur durch die Betrachtung des Sachverhalts aus komplementären Blickwinkeln. Das ist bei der Analyse von Quantenphänomenen unübersehbar geworden, es verhält sich aber bei unzähligen Fragestellungen in anderen

---

<sup>50</sup> Bohrs recht freihändiger Umgang mit dem Begriff der Komplementarität hat nicht nur Schrödinger irritiert. Einstein merkte 1949 an, dass ihm die „scharfe Formulierung [des Bohrschen Komplementaritätsprinzips] trotz vieler darauf verwandter Mühe nicht gelungen“ sei.<sup>[4, Abschließende Bemerkungen von A. Einstein]</sup> Ähnliche Beschwerden kann man bei vielen Autoren finden, der sich mit Bohrs Philosophie befasst haben. Wenn man aber bedenkt, dass das Komplementaritätsprinzip natürlich mehr noch als jeder andere Begriff dem Komplementaritätsprinzip unterliegen sollte, dann ist es nicht überraschend, und erscheint auch nicht unangemessen, wenn dieses Prinzip sich – aus verschiedenen Blickwinkeln betrachtet – unterschiedlich darstellt, und nicht auf eine einheitliche Definition reduziert werden kann.

Lebensbereichen nicht wirklich anders.

Das Prinzip der komplementären Betrachtungsweise ist in der Tat der Schlüssel zur vollständigen Erkenntnis eines Sachverhalts, oder – vorsichtiger gesagt – zu einer vollständigeren Erkenntnis des Sachverhalts, als sie mit einer einseitigen Betrachtungsweise möglich wäre. Die Evolution hat uns Menschen mit einem Erkenntnisvermögen ausgestattet, dessen Leistungsvermögen erstaunlich ist. Die Untersuchung von Quantenphänomenen zeigt uns aber auch deutlich, dass unserem Erkenntnisvermögen Grenzen gesetzt sind. Die komplementäre Betrachtungsweise hilft uns dabei, unsere Möglichkeiten innerhalb dieser Grenzen möglichst vollständig auszuschöpfen.

SCHRÖDINGER: Sicherlich gibt es Grenzen der menschlichen Erkenntnisfähigkeit. Aber ich bin nach wie vor davon überzeugt, dass Sie die Flinte zu früh ins Korn werfen, wenn Sie diese Grenzen mit den Grenzen der klassischen Physik identifizieren, und deshalb die klassische Physik für unverzichtbar erklären.

Natürlich hatte die Evolution keinen Anlass – zumindest keinen uns bekannten Anlass – uns mit der Fähigkeit auszustatten, eine vernünftige, brauchbare, schöne Quantentheorie zu entwickeln, die eigenständig anwendbar ist, und nicht mit der Prothese der klassischen Physik durch die Welt humpeln muss. Aber es ist doch kaum zu übersehen, dass unsere Denk- und Erkenntnismöglichkeiten weit über das lebensnotwendige Minimalmaß hinausgehen. Warum leistet sich die Natur eigentlich den Luxus, uns mit solch unnötigen Fähigkeiten auszustatten?

BOHR: Diese Frage ist nicht leichter zu beantworten als die Frage: Warum leistet sich die Natur überhaupt den Luxus, auf einem unbedeutenden Planeten irgendwo im Weltall so etwas wie Leben, oder gar intelligentes Leben, entstehen zu lassen?

SCHRÖDINGER: Ob man die Entstehung von Leben auf der Erde,

und vielleicht auf noch anderen Planeten irgendwo im Weltall, als puren Zufall erklären kann, das ist eine Frage die heute wohl niemand seriös beantworten kann. Aber was hier auf der Erde abläuft, das ist doch ganz gut überschaubar. Dass wir Menschen, ebenso wie alle anderen Arten, uns in einer langen Zeit der Evolution zu dem entwickelt haben was wir heute sind, das ist ja hinreichend gut belegt. Und dass unsere Vorfahren die körperlichen und geistigen Fähigkeiten besitzen mussten, um in jedem Stadium der Entwicklung geeignete ökologische Nischen zu finden und zu nutzen, ist auch klar. Aber man kann doch nicht mit irgendwelchen Zwängen der Evolution erklären, dass Menschen die Fähigkeit haben zu lernen, wie man eine partielle Differentialgleichung integriert oder die Quadratwurzel aus minus 26 zieht. Gerade die Mathematik erscheint mir als ein besonders eindrucksvolles Beispiel für menschliche Fähigkeiten, über die man umso mehr staunt, je mehr man darüber nachdenkt.

Es ist ja von vorneherein keineswegs garantiert, dass Menschen überhaupt fähig sein sollten, nennenswerte Bereiche der Welt zu verstehen. Aber das Verständnis reicht schon heute sehr weit, und wo wir mit dem anschaulichen Verstehen an Grenzen stoßen, da führt uns die Mathematik noch ein gutes Stück weiter. Denken Sie etwa an das elektromagnetische Feld. Schon zu Maxwell's Zeit bereitete das, was mathematisch so elegant und einfach daher kommt, der anschaulichen Vorstellung gewaltige Probleme. Seither hat Einstein uns auch noch den Äther weggenommen, was Maxwell's Theorie nochmals abstrakter und unanschaulicher gemacht hat. Aber mathematisch ist sie so klar und elegant wie eh und je. Die Grenzen des in der Evolution Erforderlichen mögen vielleicht die Grenzen des Anschaulichen definieren, aber gewiss nicht die Grenzen des Verstehbaren. Galilei sagte: „Das Buch der Natur

ist in der Sprache der Mathematik geschrieben.“<sup>51</sup> Offenbar hat auch er schon gesehen und selbst erlebt, zu was für erstaunlichen Erkenntnisleistungen Menschen mithilfe der Mathematik fähig sind. In gewisser Weise wachsen die Menschen in der Mathematik über sich hinaus. Woher nehmen Sie die Gewissheit, dass eine bessere Quantentheorie unmöglich ist?

BOHR: Man kann die Möglichkeit einer Theorie nachweisen, indem man sie tatsächlich entwickelt. Die Unmöglichkeit einer Theorie nachzuweisen ist dagegen ziemlich schwierig, vielleicht unmöglich. Ich werde jedenfalls nicht versuchen nachzuweisen, dass eine „vollständigere“ Theorie, wie sie Ihnen und Einstein vorschwebt, unmöglich ist.<sup>52</sup> Aber die Menge der nachprüfbaren Voraussagen, die Ihre Theorie produzieren wird, kann nicht über die Voraussagen der Quantentheorie hinausgehen. Das heißt Sie werden in Ihrer Theorie lediglich zusätzlichen Ballast mitschleppen, ohne daraus zusätzlichen Nutzen ziehen zu können. Denn alles das, was beobachtet wird und beobachtet werden kann, wird auch schon durch die heute bekannte Quantentheorie beschrieben. Warum sollte man sich die Mühe machen, den Formalismus der Theorie aufzublähen, wenn damit kein zusätzlicher physikalischer Inhalt einhergeht?

Eine mögliche Unzulänglichkeit der Quantentheorie, die mich tatsächlich schon länger beunruhigt, könnte man eher darin sehen, dass es so überaus schwierig zu sein scheint, sie in relativistisch invarianter Weise zu formulieren.

SCHRÖDINGER: Das hängt mit der merkwürdigen Sonderrolle zusammen, die die Zeit in der Quantentheorie spielt. Wenn man sagt, dass kanonisch konjugierte Variable wie Ort und Impuls eines

---

<sup>51</sup> Man findet das Zitat (suchen nach „scritto in lingua matematica“) in Galileo Galilei: *Il Saggiatore* (1623), [http://www.liberliber.it/mediateca/libri/g/galilei/il\\_saggiatore/pdf/il\\_sag\\_p.pdf](http://www.liberliber.it/mediateca/libri/g/galilei/il_saggiatore/pdf/il_sag_p.pdf)

<sup>52</sup> Der Herausgeber verweist nochmals auf Fußnote 27 auf Seite 33.

Teilchens nicht gleichzeitig scharf definierte Werte haben, dann stellt man sich vor, dass eine Messung des Impulses oder des Ortes zu einem beliebig scharf definierten Zeitpunkt erfolgen könnte. Ich habe in den vergangenen Jahren wiederholt darauf hingewiesen, dass eine Formulierung wie „scharf definierte Zeit“ in der Quantentheorie ein Fremdkörper ist, leider ohne einen besseren Vorschlag machen zu können. Es fällt ja auch auf, dass die Quantenmechanik einen hermiteschen Ortsoperator kennt, aber keinen hermiteschen Zeitoperator, während in einer relativistisch kovarianten Theorie Ort und Zeit als wesentlich gleichartige Variable betrachtet werden müssen. Die befremdende Sonderrolle der Zeit ist ein weiteres deutliches Indiz dafür, dass die Quantentheorie in ihrer heutigen Form von Grund auf verkorkst ist. Sie ist sozusagen derartig verquer richtig, dass nicht einmal ihr Gegenteil eindeutig falsch ist.

## Literatur

- [1] E. Schrödinger :  
*Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik*,  
Naturwissenschaften **23**, 807–812 , 823–828 , 844–849 (1935)  
[http://www.psiquadrat.de/downloads/schroedinger35\\_katze1.pdf](http://www.psiquadrat.de/downloads/schroedinger35_katze1.pdf)  
[http://www.psiquadrat.de/downloads/schroedinger35\\_katze2.pdf](http://www.psiquadrat.de/downloads/schroedinger35_katze2.pdf)  
[http://www.psiquadrat.de/downloads/schroedinger35\\_katze3.pdf](http://www.psiquadrat.de/downloads/schroedinger35_katze3.pdf)
- [2] A. Einstein, B. Podolsky, N. Rosen : *Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?*,  
Phys. Rev. **47**, 777–780 (1935)  
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRev.47.777>
- [3] N. Bohr : *Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete?*, Phys. Rev. **48**, 696–702 (1935)  
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRev.48.696>

- [4] N. Bohr : *Diskussion mit Einstein über erkenntnistheoretische Probleme in der Atomphysik*,  
in P. A. Schilpp (Hrsg.): *Albert Einstein als Philosoph und Naturforscher* (Kohlhammer, Stuttgart, 1955, Nachdruck: F.Vieweg, Braunschweig, 1983)
- [5] Niels Bohr : *Atomphysik und menschliche Erkenntnis*  
(F.Vieweg, Braunschweig, 1958)
- [6] Werner Heisenberg : *Physik und Philosophie*  
Gifford Lectures, Univ. St. Andrews, Scotland, 1955/56  
(Hirzel Verlag, Stuttgart, 1959)  
Kap. III : *Die Kopenhagener Deutung der Quantentheorie*,  
[http://www.astrophys-neunhof.de/serv/Heisenberg\\_1955.pdf](http://www.astrophys-neunhof.de/serv/Heisenberg_1955.pdf)
- [7] Werner Heisenberg : *Der Teil und das Ganze*  
(Piper Verlag, München, 1969)